

CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DAS CONDIÇÕES DE CONFORTO TÉRMICO E VENTILAÇÃO DE EDIFÍCIOS DE HABITAÇÃO DE CUSTOS CONTROLADOS

PEDRO MIGUEL DA CRUZ MELO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES

Orientadora: Professora Doutora Eva Sofia Botelho Machado Barreira

Coorientadora: Professora Doutora Maria de Lurdes de Oliveira
Simões

JUNHO DE 2024

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2023/2024

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

✉ m.ec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado em Engenharia Civil – 2023/2024 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2024*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Pais, Irmã e Avós

*“Everyone can rise above their circumstances and achieve success if they are
dedicated to and passionate about what they do.”*

Nelson Mandela

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha sincera gratidão a todas as pessoas e instituições que contribuíram para a realização desta dissertação. Todos desempenharam um papel crucial durante esta etapa fundamental da minha carreira como estudante, a todos, o meu mais profundo agradecimento.

Em primeiro lugar quero expressar a minha sincera gratidão à minha orientadora durante este trabalho, Professora Doutora Eva Sofia Botelho Machado Barreira, pela orientação, paciência e apoio inestimáveis ao longo deste processo. Muito obrigado pelos conhecimentos técnicos que me transmitiu de valor incalculável, mas também, por todo o apoio e disponibilidade que demonstrou comigo durante este período. Sinto-me privilegiado por ter tido a oportunidade de desenvolver este trabalho consigo.

Agradeço à minha coorientadora, Professora Doutora Maria de Lurdes de Oliveira Simões, pelas suas orientações e conhecimentos transmitidos e que foram vitais para a conclusão deste trabalho. Fico feliz por ter tido a oportunidade de aprimorar os meus conhecimentos sob a sua orientação.

Ao Laboratório de Física de Construções da Faculdade de Engenharia do Porto, agradeço especialmente ao Engenheiro Eduardo Costa e ao estudante de doutoramento Ahmad Almomani por todo o tempo que disponibilizaram a transmitir-me os conhecimentos indispensáveis à utilização dos equipamentos e à realização dos ensaios levados a cabo neste trabalho.

Quero expressar o meu agradecimento ao Espaço Municipal pela atenção e pelo fornecimento dos dados indispensáveis à elaboração desta dissertação. Para além disso, estou grato também pela disponibilidade e flexibilidade no agendamento dos ensaios efetuados.

Aos moradores e trabalhadores na obra de reabilitação pela disponibilidade, simpatia e apoio fornecido durante a realização dos ensaios.

À minha família, pelo amor incondicional e encorajamento constantes. Sem o vosso apoio, Pais, Irmã e Avós, não teria sido capaz de concluir uma das etapas mais importantes da minha vida, e, por isso, estou-vos eternamente grato. É por vossa causa que sou o que sou hoje, obrigado por tudo o que sacrificam, sacrificaram e vão continuar a sacrificar em prol da minha felicidade. Amo-vos.

Quero deixar um agradecimento especial aos meus Amigos que me acompanharam durante esta fase académica ou até há mais tempo. Obrigado pelo apoio e encorajamento que me deram todos estes anos e por continuarmos a criar memórias que durarão a vida inteira. Aproveito para felicitar todos aqueles que concluem as suas carreiras académicas.

Muito Obrigado mais uma vez a todos os descritos anteriormente, todos desempenharam papeis fundamentais e únicos nesta viagem, estou grato por todos vocês.

RESUMO

O ambiente térmico em habitações desempenha um papel fundamental no bem-estar dos residentes, na eficiência energética, na sustentabilidade ambiental e na qualidade geral de vida. Um planeamento cuidadoso e o uso de tecnologias apropriadas são essenciais para criar ambientes internos confortáveis e sustentáveis. Um ambiente térmico adequado contribui para a produtividade e bem-estar dos moradores, impactando positivamente a qualidade de vida. Ambientes desconfortáveis podem causar stress e reduzir a capacidade de concentração.

O objetivo deste trabalho tem como intuito avaliar as condições de conforto térmico e ventilação em sete habitações de custos controlados localizados na zona de Sobreiro da Maia. As habitações em questão estão a ser alvo de reabilitações, pelo que o objetivo deste caso de estudo passa por avaliar as condições antes e após a reabilitação. Com estes objetivos em mente, foi realizada uma campanha experimental que se iniciou em julho de 2023 e terminou em maio de 2024, no qual foram recolhidos dados relativos à temperatura e humidade relativa dos compartimentos principais destes sete apartamentos. Para além disso, foram realizadas três campanhas de procedimentos experimentais com o intuito de avaliar o sistema de ventilação destes apartamentos.

Uma vez realizadas as campanhas experimentais e recolhidos os dados necessários, a análise foi feita consoante a norma EN 16798. Para além da análise segundo a norma europeia, foi feita uma análise estatística dos dados com o intuito de identificar comportamentos padrão entre os apartamentos testados.

Da interpretação dos resultados, verificou-se que os vários apartamentos apresentam valores de temperatura que se situam dentro das faixas de conforto no verão e abaixo dos limites de conforto no inverno. Através da análise estatística, concluiu-se que existem efetivamente algumas diferenças pontuais entre os apartamentos, que vieram ser corroboradas pela análise segundo a EN 16798. Através do método do gás traçador, verificou-se que duas das divisões testadas revelam taxas de renovação horária do ar acima dos valores referência presentes na NP-1037.

PALAVRAS-CHAVE: Ambiente térmico, conforto térmico, ventilação, habitações de custos controlados, campanha experimental.

ABSTRACT

The thermal environment in housing plays a fundamental role in the well-being of residents, energy efficiency, environmental sustainability, and overall quality of life. Careful planning and the use of appropriate technologies are essential to create comfortable and sustainable indoor environments. An adequate thermal environment contributes to the productivity and well-being of the residents, positively impacting their quality of life. Uncomfortable environments can cause stress and reduce the ability to concentrate.

The objective of this work is to evaluate the conditions of thermal comfort and ventilation in seven controlled-cost housing units located in the Sobreiro da Maia area. The housing units in question are undergoing rehabilitation, and the aim of this case study is to assess the conditions before and after the rehabilitation. With these objectives in mind, an experimental campaign was carried out from July 2023 to May 2024, during which data on temperature and relative humidity of the main compartments of these seven apartments were collected. Additionally, three experimental procedure campaigns were conducted to evaluate the ventilation system of these apartments.

Once the experimental campaigns were conducted and the necessary data collected, the analysis was carried out according to the EN 16798 standard. In addition to the analysis according to the European standard, a statistical analysis of the data was performed to identify common patterns among the tested apartments.

From the interpretation of the results, it was found that the various apartments have temperature values that fall within the comfort ranges in summer and below the comfort limits in winter. Through statistical analysis, it was concluded that there are indeed some occasional differences between the apartments, which were corroborated by the analysis according to EN 16798. Using the tracer gas method, it was found that two of the tested rooms show air renewal rates above the reference values present in NP-1037.

KEYWORDS: Thermal environment, thermal comfort, ventilation, controlled-cost housing units, experimental campaign.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS.....	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
INTRODUÇÃO	1
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO.....	2
1.3. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA DO TEXTO	2
CONFORTO TÉRMICO.....	5
2.1. CONTEXTUALIZAÇÃO	5
2.2. EQUILÍBRIO TÉRMICO	6
2.3. NORMAS PARA AVALIAR CONFORTO TÉRMICO	8
2.3.1. MODELOS PARA AVALIAÇÃO DO CONFORTO.....	8
2.4.1. ASHRAE 55:2013.....	9
2.4.3. EN 16798:2019	10
2.4. ESTUDOS REALIZADOS E VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DE CONFORTO.....	12
2.5. IMPORTANCIA DE AVALIAR O CONFORTO TÉRMICO EM EDIFÍCIOS	14
VENTILAÇÃO.....	17
3.1. ENQUADRAMENTO.....	17
3.2. TIPOS DE SISTEMAS DE VENTILAÇÃO.....	18
3.3. VENTILAÇÃO E QUALIDADE DO AR INTERIOR	21
3.4. MÉTODO DO GÁS TRAÇADOR	22
METODOLOGIA.....	25
4.1. ENQUADRAMENTO.....	25
4.2. CARACTERIZAÇÃO DOS CASOS DE ESTUDO	25
4.2.1. LOCALIZAÇÃO E CLIMA.....	25
4.2.2. CARACTERIZAÇÃO DOS EDIFÍCIOS	26
4.2.3. CARACTERIZAÇÃO DAS HABITAÇÕES ESTUDADAS	29
4.3. METODOLOGIA DE ENSAIO.....	31
4.3.1. EQUIPAMENTOS	31
4.3.2. ENSAIOS LABORATORIAIS PRELIMINARES	32
4.3.3. CRONOGRAMA E CONDIÇÕES DE ENSAIO	34
RESULTADOS.....	37
5.1. CONDIÇÕES HIGROTÉRMICAS.....	37
5.1.1. CONDIÇÕES HIGROTÉRMICAS EXTERIORES.....	37
5.1.2. ANÁLISE ESTATÍSTICA DESCRITIVA	39

5.1.3. APLICAÇÃO DE TESTES ESTATÍSTICOS.....	48
5.2. AVALIAÇÃO DO CONFORTO	49
5.2.1. TEMPERATURA INTERIOR	49
5.2.2. O MODELO DA EN 16798	56
5.2.3. HUMIDADE RELATIVA INTERIOR	60
5.3. VENTILAÇÃO	63
5.3.1. MÉTODO DO GÁS TRAÇADOR	63
5.3.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS	64
CONCLUSÕES	69
6.1. CONCLUSÕES DIRETAS.....	69
6.2. PROPOSTAS PARA O FUTURO	69
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Relação entre PPD e PMV [4].	6
Figura 2 – Balanço térmico no corpo humano [1].	7
Figura 3 – Diagrama representativo do conforto térmico humano de acordo com a temperatura e a humidade relativa [11].	8
Figura 4 - Modelo adaptativo segundo a ASHRAE 55:2013 [3].	9
Figura 5 - Intervalos de valores recomendados da temperatura operativa interior para edifícios com ventilação natural, em função da temperatura média exterior exponencialmente ponderada [14].	11
Figura 6 - Resultados do estudo de Han et al.: (a) Respostas dos intervenientes no estudo à sensação térmica; (b) Cálculo da temperatura de conforto [13].	12
Figura 7 - Resultados do estudo de Han et al.: Cálculo da temperatura preferida [13].	13
Figura 8 - Resultados do estudo de Jiao et al.: (a) Análise do conforto térmico seguindo a Norma EN15251; (b) Análise do conforto térmico seguindo a ASHRAE 55 [6].	14
Figura 9 - Número de estudos sobre conforto térmico publicados ao longo dos anos [8].	15
Figura 10 - Exemplo de ventilação natural de um fogo (adaptado de [20]).	18
Figura 11 - Esquemas em planta dos efeitos da ventilação por ação do vento: (a) ventilação cruzada; (b) ventilação unilateral [18].	19
Figura 12 - Fluxo de ar consoante a temperatura [17].	20
Figura 13 - Localização dos apartamentos em estudo e da estação meteorológica de onde foram retirados os dados de temperatura e humidade relativa exteriores [21].	26
Figura 14 - Planta tipo dos apartamentos em estudo e localização genérica dos sensores de T e HR.	27
Figura 15 - Vista exterior das fachadas de um dos edifícios em estudo.	27
Figura 16 - Vista exterior das empenas de um dos edifícios em estudo.	27
Figura 17 - Caixilharias da sala dos apartamentos estudados: (a) C-RC; (b) A-3º; (c) A-RC.	28
Figura 18 - Vista exterior das coberturas dos edifícios em estudo.	29
Figura 19 - Sistema de ventilação nos compartimentos de serviço: (a) Extração mecânica na cozinha; (b) Ventilação natural por abertura das janelas nas instalações sanitárias.	29
Figura 20 - Planta de implantação dos edifícios em estudo, com a designação atribuída a cada um deles.	30
Figura 21 - Sensor de temperatura e humidade relativa utilizado neste estudo	31
Figura 22 - Sensor para medição da concentração de dióxido de carbono.	32
Figura 23 - Resultados da aferição relativa dos sensores de T e HR: a) Temperatura; b) Humidade relativa.	32
Figura 24 - Ensaio de aferição dos sensores para medição da concentração de CO2 efetuado em laboratório.	33

Figura 25 - Resultados da aferição relativa dos sensores de medição da concentração de CO ₂	33
Figura 26 - Localização dos sensores de CO ₂ durante os ensaios.	35
Figura 27 - Variação da Temperatura exterior durante o período de testagens.....	38
Figura 28 - Variação da Humidade relativa exterior durante o período de testagens.	38
Figura 29 - Representação da distribuição da temperatura interior nas salas dos vários apartamentos e da temperatura exterior por mês.....	40
Figura 30 - Representação da distribuição da humidade relativa interior nas salas dos vários apartamentos e da humidade relativa exterior por mês.....	41
Figura 31 - Representação da distribuição da temperatura interior no quarto principal dos vários apartamentos e da temperatura exterior por mês.....	42
Figura 32 - Representação da distribuição da humidade relativa interior no quarto principal dos vários apartamentos e da humidade relativa exterior por mês.	43
Figura 33 - Representação da distribuição da temperatura interior no quarto secundário dos vários apartamentos e da temperatura exterior por mês.	44
Figura 34 - Representação da distribuição da humidade relativa interior no quarto secundário dos vários apartamentos e da humidade relativa exterior por mês.	44
Figura 35 - Representação da distribuição da temperatura interior entre o apartamento A-RC e A-3º.....	45
Figura 36 - Representação da distribuição da humidade relativa interior entre o apartamento A-RC e A-3º.	46
Figura 37 - Representação da distribuição da temperatura interior entre o apartamento A-RC e E-3º.....	47
Figura 38 - Representação da distribuição da humidade relativa interior entre o apartamento A-RC e E-3º.	47
Figura 39 - Variação dos limites de conforto e da temperatura interior e exterior ao longo do tempo (A-RC).	50
Figura 40 - Variação dos limites de conforto e da temperatura interior e exterior ao longo do tempo (A-3º).	51
Figura 41 - Variação os limites de conforto e da temperatura interior e exterior ao longo do tempo (B-RC).	52
Figura 42 - Variação dos limites de conforto e da temperatura interior e exterior ao longo do tempo (C-RC).	53
Figura 43 - Variação dos limites de conforto e da temperatura interior e exterior ao longo do tempo (C-2º).	54
Figura 44 - Variação dos limites de conforto e da temperatura interior e exterior ao longo do tempo (D-1º).	55
Figura 45 - Variação dos limites de conforto e da temperatura interior e exterior ao longo do tempo (E-3º).	56

Figura 46 - Aplicação do modelo da EN 16798: Registos no apartamento (a) A-RC; (b) A-3º; (c) B-RC; (d) C-RC; (e) C-2º; (f) D-1º; (g) E-3º.....	60
Figura 47 - Variação da HR interior: Registos no apartamento (a) A-RC; (b) A-3º; (c) B-RC; (d) C-RC; (e) C-2º; (f) D-1º; (g) E-3º.....	63
Figura 48 - Folha de cálculo para análise dos resultados obtidos pelo método do dás traçador.	64
Figura 49 - Gráfico radar com a média das velocidades e direção do vento: (a) Ronda 1; (b) Ronda 2; (c) Ronda 3.....	65
Figura 50 - Renovações horárias nas divisões durante os testes efetuados.	66

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Relação entre a velocidade do ar e o parâmetro A [3].	10
Tabela 2 - Intervalo de temperatura de conforto associado a cada categoria [14].	11
Tabela 3 - Vantagens e desvantagens dos sistemas apresentados [20].	20
Tabela 4 - Caudais-tipo a extrair dos compartimentos de serviço [16].	22
Tabela 5 - Caudais-tipo a admitir aos compartimentos principais [16].	22
Tabela 6 - Caracterização, por divisão, de cada uma das habitações em estudo.	30
Tabela 7 - Características dos sensores de temperatura e humidade relativa [25].	31
Tabela 8 - Características dos sensores para medição da concentração de CO ₂ [24].	32
Tabela 9 - Sensores de T e HR utilizados nas habitações estudadas (edifícios A a E da Figura 20).	34
Tabela 10 - Cenários considerados nos ensaios para avaliar a ventilação na habitação em estudo (edifício T da Figura 20).	34
Tabela 11 - Resultados do teste de Wilcoxon aplicado aos vários apartamentos em estudo.	48
Tabela 12 - Renovações horárias (Rph-1) obtidos nos testes efetuados pelo método do gás traçador.	64

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

SÍMBOLOS

C - Trocas de Calor por Convecção (W/m^2)
C(t) - Concentração volúmica do gás no instante t (ppm)
C_{ext} - Concentração volúmica do gás traçador (ppm)
E - Perdas de Calor por Evaporação (W/m^2)
K - Trocas de Calor por Condução (W/m^2)
M - Poder Metabólico (W/m^2)
Q - Caudal de ventilação (m^3/s)
R - Trocas de Calor por Radiação (W/m^2)
T - Trocas de Energia (W/m^2)
T_{op} - Temperatura operativa de conforto ($^{\circ}\text{C}$)
T_{rm} - Temperatura exterior média exponencialmente ponderada ($^{\circ}\text{C}$)
t - Tempo (s)
t_a - Temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$)
t_{oc} - Temperatura operativa de conforto ($^{\circ}\text{C}$)
t_r - Temperatura média radiante ($^{\circ}\text{C}$)
V - Volume efetivo do espaço (m^3)
v_{ar} - Velocidade do ar (m/s)
W - Poder Mecânico (W/m^2)

ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

ASHRAE - American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers
AVAC - Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
CO₂ - Dióxido de Carbono
CO - Monóxido de Carbono
EN - European Standard
NP - Norma Portuguesa
NUTS - Nomenclatura das Unidades Territoriais para Fins Estatísticos
PMV - Predicted Mean Value
PPD - Predicted Percentage of Dissatisfied
PPM - Partes Por Milhão
TQ1 – Temperatura do Quarto 1

TQ2 – Temperatura do Quarto 2

TS – Temperatura da Sala

Rph⁻¹ - Renovações por Hora

INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Atualmente garantir um bom ambiente térmico dentro das habitações é essencial para garantir qualidade de vida e bem-estar dos moradores. A busca pelo conforto térmico é um desafio constante, especialmente em contextos de mudanças climáticas, que intensificam as variações extremas de temperatura. Por esse motivo, é crucial monitorizar parâmetros ambientais que são usados para controlar o conforto dentro dos espaços habitacionais.

É indispensável garantir condições satisfatórias em ambientes habitacionais para garantir boas condições de conforto, especialmente nestes espaços em que os moradores passam uma parte significativa do seu dia. Portanto, o estudo do conforto térmico em habitações é crucial para o desenvolvimento de estratégias e soluções que proporcionem ambientes internos saudáveis e confortáveis. No caso de habitações de custos controlados, onde maioritariamente são aplicadas soluções construtivas mais simples e acessíveis, o estudo dos parâmetros que influenciam o ambiente térmico deve ser mais rigoroso para identificar práticas construtivas adequadas a cada situação em específico.

O estudo do conforto térmico analisa parâmetros ambientais como a temperatura exterior, a humidade relativa exterior e a concentração de dióxido de carbono no ar exterior. Também são monitorizados valores de temperatura, humidade e concentração de dióxido de carbono no interior das habitações. A análise destes parâmetros é feita consoante as normas e regulamentos existentes atualmente, que, através de modelos teóricos e adaptativos avaliam o conforto térmico interior baseando-se nos parâmetros anteriormente referidos.

Aprofundar o conhecimento nesta área é essencial para otimizar o desempenho das habitações em áreas como a sustentabilidade ambiental, a eficiência energética e a qualidade do ar interior.

1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO

A dissertação apresentada tem como objetivo principal avaliar e analisar as condições de conforto térmico em habitações de custos controlados. Para tal finalidade, foram estabelecidos um conjunto de objetivos a serem alcançados, tais como:

- Monitorizar parâmetros de temperatura e humidade relativa, exterior e interior;
- Aprofundar o conhecimento nas áreas do conforto térmico e da ventilação de edifícios;
- Identificar normas para avaliar o conforto térmico;
- Organização dos dados de temperatura e humidade recolhidos;
- Avaliar a renovação do ar interior dentro das habitações estudadas;
- Relacionar características intrínsecas dos edifícios com os dados recolhidos e o comportamento térmico analisado;
- Comparar as características dos vários edifícios entre eles e com o ambiente exterior.

1.3. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA DO TEXTO

A presente dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos, compilando os seguintes temas:

- Capítulo 1 – O primeiro capítulo diz respeito à introdução, no qual estão expostos os principais objetivos deste trabalho, bem como, uma descrição resumida da organização geral dos vários capítulos que compõem esta dissertação;
- Capítulo 2 – O capítulo em questão sintetiza conceitos fundamentais do conforto térmico. Em primeiro lugar são expostas definições relativas ao conceito de equilíbrio térmico. Depois são apresentadas duas normas para avaliar o conforto térmico. Por fim, são destacados alguns estudos, acerca da análise do conforto térmico em habitações;
- Capítulo 3 – Este capítulo condensa informação e conhecimento existentes sobre a ventilação de edifícios. Apresenta características fundamentais relativas a sistemas de ventilação, com foco nos sistemas que são relevantes para esta dissertação. De seguida são representados parâmetros usados para avaliar a ventilação e qualidade do ar interior em habitações. Para concluir este capítulo é descrito o método do gás traçador para avaliar a renovação do ar em espaços interiores.
- Capítulo 4 – Diz respeito à metodologia envolvida neste trabalho. Numa primeira parte envolve a descrição da localização geográfica das habitações envolvidas neste estudo e a descrição das características destes edifícios. Numa segunda parte expõe os equipamentos utilizados e uma descrição dos procedimentos levados a cabo nos ensaios experimentais realizados;
- Capítulo 5 – São expostos os resultados obtidos na análise do conforto térmico realizado nas habitações em estudo. Numa primeira fase é analisada a evolução das condições térmicas exteriores. De seguida é feita uma análise estatística dos parâmetros medidos no interior das habitações. No fim são analisadas as condições de conforto térmico segundo a norma de conforto estabelecida.

- Capítulo 6 – Neste capítulo final são resumidas as principais conclusões desta dissertação e são também feitas propostas de melhorias para o futuro.

2

CONFORTO TÉRMICO

2.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

O estudo do ambiente térmico em edifícios ganhou relevância em finais do século XIX e inícios do século XX. Estes investigadores estudaram as reações fisiológicas do corpo humano a diferentes ambientes térmicos e desenvolveram conceitos que agora são conceitos base no estudo de transferências de calor e termorregulação.

Avançando até aos anos 1970, é publicado o trabalho de Povl Ole Fanger um perito na área do conforto térmico e perceção de ambientes interiores. A sua investigação permitiu-lhe desenvolver índices que são usados para prever o nível de conforto de um grupo de pessoas baseados em parâmetros ambientais e pessoais. Estes parâmetros são os apresentados de seguida [1][2]:

- Temperatura do ar;
- Temperatura média radiante;
- Humidade relativa do ar;
- Velocidade do ar;
- Atividade metabólica dos ocupantes;
- Vestuário.

Os índices por ele criados são denominados por “Predicted Mean Vote” (PMV) e “Predicted Percentage Dissatisfied” (PPD) [2]. Inicialmente Fanger definiu uma escala para avaliar a sensação térmica com 7 níveis, esta escala vai do -3 até ao 3, sendo que -3 corresponde a muito frio e o 3 corresponde a muito quente, traduzindo assim o nível de desconforto associado aos testes efetuados com diferentes variáveis pessoais e ambientais testadas em câmaras climáticas em laboratório. A relação entre esta escala e a equação do balanço térmico permite calcular o PMV e depois através do PMV pode-se calcular o PPD. A relação entre estes dois indicadores pode ser expressa graficamente:

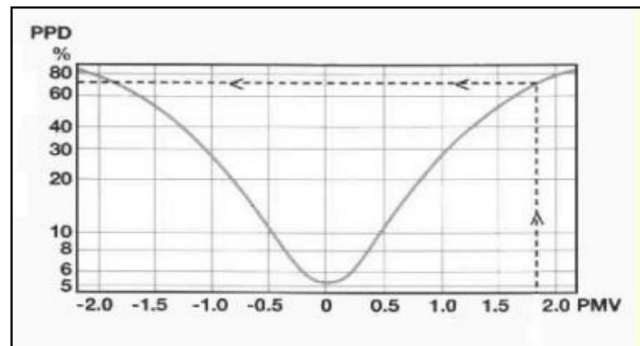


Figura 1 – Relação entre PPD e PMV [4].

A sua pesquisa culminou com a publicação do livro “Thermal Comfort. Analysis and Applications in Environmental Engineering” e muitos trabalhos de pesquisa que serviram como inspiração na criação das várias normas atualmente utilizadas, tais como: ISO 7730:2005, ASHRAE 55:2004 e a EN 15251 [2]. Atualmente, o conforto térmico tem sido um conceito crucial no caminho para atingir alguns dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, criados pelas Nações Unidas. Estes objetivos visam alcançar “boa saúde e bem-estar”, “cidades e comunidades sustentáveis” e “energia limpa e acessível”.

Segundo a ASHRAE 55, o conceito de conforto térmico é descrito como a percepção de satisfação expressa pela mente humana com o ambiente térmico em que está inserida. Vários estudos são atualmente levados a cabo com o intuito de avaliar o conforto térmico de espaços para prever como é que os indivíduos vão reagir em certas situações e a que temperatura é que se vão sentir confortáveis, designamos esta temperatura de “temperatura de conforto”. Estudos levados a cabo aferiram que este intervalo de conforto é menor em hospitais e escolas do que em edifícios residenciais, a razão também advém do facto de nestes a oportunidade de adaptação do indivíduo ser maior do que num outro espaço [7][8].

2.2. EQUILÍBRIO TÉRMICO

O conceito de equilíbrio térmico sempre foi fundamental na termodinâmica e cada vez mais tem ganho relevância por ser algo que influencia diretamente a saúde e bem-estar das pessoas. O equilíbrio térmico é alcançado quando dentro de um sistema, os corpos em interação uns com os outros, atingem a mesma temperatura e as trocas de energia entre eles cessam [1].

O corpo humano é dotado de várias formas de se adaptar ao ambiente térmico que o rodeia, através de diferentes mecanismos fisiológicos e comportamentais utilizados para manter a homeostase. Essas adaptações são fundamentais de um ponto de vista de saúde, conforto e produtividade. Estes mecanismos podem ser separados em dois tipos, caso a regulação esteja a ser feita ao calor ou ao frio. Numa tentativa de adaptação ao calor, o corpo humano naturalmente começará a suar e os

vasos sanguíneos a dilatar, por sua vez numa tentativa de adaptação ao frio, o corpo humano reagirá restringindo os vasos sanguíneos e provocando tremores involuntários.

Analicamente é possível calcularmos as trocas de energia para manutenção do equilíbrio térmico de um corpo, diz-se que um corpo está em equilíbrio térmico quando esta taxa é igual a 0, ou seja quando as trocas de energia entre o corpo e o sistema igualam a 0 [1]. A expressão é a seguinte:

$$T = M - W - E \pm R \pm C \pm K \quad (1)$$

Em que:

T = Trocas de Energia [W/m^2];

M = Poder Metabólico [W/m^2];

W = Poder Mecânico [W/m^2];

E = Perdas de Calor por Evaporação [W/m^2];

R = Trocas de Calor por Radiação [W/m^2];

C = Trocas de Calor por Convecção [W/m^2];

K = Trocas de Calor por Condução [W/m^2].



Figura 2 – Balanço térmico no corpo humano [1].

O poder metabólico e o poder mecânico são variáveis que dependem de cada sujeito individualmente e da atividade que está a ser desempenhada. Por sua vez, as perdas de calor por evaporação dão-se por libertação do vapor de água e de suor pela pele. Por meio de radiação, podem existir tanto ganhos como perdas de calor, sendo que estas são efetuadas através de trocas realizadas pela superfície corporal, o vestuário e a envolvente em que o corpo está inserido. As trocas de calor entre o corpo e o ar envolvente são feitas por convecção, e para além disso se o corpo em questão tiver contacto com um sólido presente na envolvente, existirão também trocas de energia por condução [1][9].

Quando as condições necessárias para que exista conforto térmico não são atendidas, os indivíduos vão experienciar desconforto térmico. O desconforto pode ser de duas formas, ou desconforto total ou desconforto localizado. O desconforto total é habitualmente causado por temperaturas baixas ou altas e por humidades relativas altas (Figura 3). No caso do desconforto

localizado, que acontece quando apenas uma parte do corpo está mais fria ou quente que o resto do corpo, pode ser causado por correntes de ar, pavimentos com temperaturas muito altas ou muito baixas e temperatura média radiante assimétrica [11].



Figura 3 – Diagrama representativo do conforto térmico humano de acordo com a temperatura e a humidade relativa [11].

2.3. NORMAS PARA AVALIAR CONFORTO TÉRMICO

2.3.1. MODELOS PARA AVALIAÇÃO DO CONFORTO

Para avaliar o conforto térmico num certo ambiente interior, podem ser consideradas duas abordagens, uma abordagem baseada em modelos teóricos ou uma baseada em modelos adaptativos.

Os modelos teóricos são projetados para serem aplicáveis em qualquer situação, as variáveis dependentes de fatores aleatórios como o metabolismo humano ou as condições climáticas exteriores são obtidas através de valores tabelados. De forma a calcular o conforto térmico, utilizam índices como o PMV e o PPD referidos anteriormente. Estes modelos são ideais para avaliar ambientes térmicos em que as condições climáticas são rigorosamente controladas (edifícios com sistemas AVAC), no entanto, como não consideram a adaptabilidade dos ocupantes, a sua precisão será menor em ambientes térmicos cujas variáveis não são controladas (edifícios naturalmente ventilados) [4].

Os modelos adaptativos diferem dos teóricos pelo facto de que consideram que os ocupantes ajustam o seu comportamento, vestuário e expectativas em resposta ao ambiente térmico em que estão inseridos. Este tipo de modelo vem refutar a teoria de que o conforto térmico é apenas influenciado pela relação entre o ambiente e o indivíduo, mas, principalmente pela forma como o indivíduo se adapta ao meio em que está. São considerados novos parâmetros tais como características do indivíduo (idade, género), enquadramento do meio ambiente (estação do ano, qualidade do ar). Para avaliar o conforto térmico usam-se relações empíricas entre a temperatura interna aceitável e a temperatura externa média. Estes modelos revelam uma maior aplicabilidade em ambientes controlados de edifícios naturalmente ventilados, por outro lado, as previsões

podem-se revelar menos precisas em contextos em que existe grande variabilidade nas respostas individuais ao ambiente térmico [4].

2.4.1. ASHRAE 55:2013

A ASHRAE 55:2013 é uma das normas mais amplamente reconhecida para avaliar o conforto térmico, que foi desenvolvida pela “American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers” através do contributo de vários cientistas e investigadores. Esta norma propõe uma abordagem adaptativa baseada em conceitos como a temperatura média mensal exterior e a temperatura operativa de conforto [3][4][5]. Com estas duas variáveis é possível analisar o conforto através do gráfico da Figura 4:

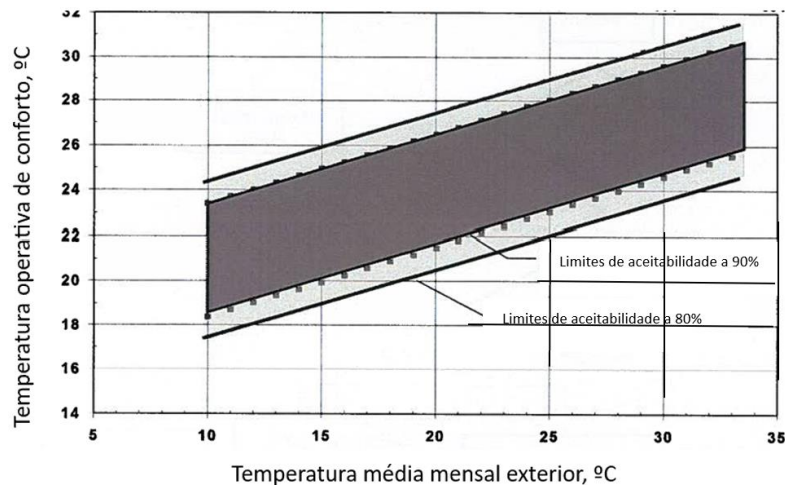


Figura 4 - Modelo adaptativo segundo a ASHRAE 55:2013 [3].

Na norma estão definidos dois intervalos para a temperatura de conforto, um correspondente a uma gama de aprovação de 80%, e outro para uma aprovação de 90% [3].

A temperatura média mensal exterior corresponde à temperatura média exterior dos últimos 30 dias. A temperatura operativa de conforto é uma medida que traduz a sensação térmica dos indivíduos num certo ambiente térmico, combinando os efeitos da temperatura do ar e da temperatura média radiante. Pode ser calculada através da Equação (2) [3].

$$t_{oc} = A \cdot t_a + (1-A) \cdot t_r \quad (2)$$

Sendo:

t_{oc} = Temperatura operativa de conforto (°C);

t_a = Temperatura do ar (°C);

t_r = Temperatura média radiante (°C);

A = Pode ser definido através da Tabela 1, em função da velocidade do ar, v_r .

Tabela 1 - Relação entre a velocidade do ar e o parâmetro A [3].

v_r (m/s)	<0,2	[0,2;0,6]	[0,6;1,0]
A	0,5	0,6	0,7

São definidos na ASHRAE 55 [3] os limites para aplicação do modelo adaptativo, nomeadamente:

- A taxa metabólica dos indivíduos deve estar compreendida entre 1,0 e 1,3 met;
- Ausência de sistemas mecânicos de aquecimento e arrefecimento;
- A temperatura média mensal exterior deve corresponder à temperatura média exterior dos últimos 30 dias, e deve estar compreendida num intervalo de valores de [10-33,5] °C;
- Os indivíduos podem-se adaptar ao ambiente térmico através de mudanças no vestuário, desde que a resistência térmica do vestuário esteja compreendida num intervalo de valores de [0,5-1,0] clo;
- Devem ser respeitados os limites impostos à velocidade do ar.

2.4.3. EN 16798:2019

O foco da EN 16798:2019 [14] abrange requisitos específicos para parâmetros ambientais internos como qualidade do ar interior, acústica, iluminação, design de edifícios. Esta norma, publicada em 2019, é uma versão mais recente e atualizada da internacionalmente reconhecida EN 15251, publicada em 2007. As diferenças apresentadas entre as normas refletem a evolução no conhecimento, nas técnicas de medição e dos materiais de construção e tecnologias construtivas. A norma encontra-se dividida em duas partes, uma parte regulamentar e uma parte técnica. Tem em conta diferenças nas expectativas de conforto entre cada indivíduo, as diferenças em avaliar o conforto térmico em espaços ventilados naturalmente ou mecanicamente, fatores de iluminação natural e horários dos ocupantes e também propõe uma avaliação anual do ambiente térmico interno.

Existem 4 categorias para caracterizar os edifícios consoante o seu tipo de utilização, nomeadamente a Categoria I para hospitais e edifícios com indivíduos frágeis, a Categoria II para construções novas, a Categoria III para edifícios já existentes e a Categoria IV para edifícios que não se enquadrem dentro dos limites impostos por cada uma das categorias anteriores. Os intervalos para a temperatura operativa de conforto apresentam-se na Figura 5.

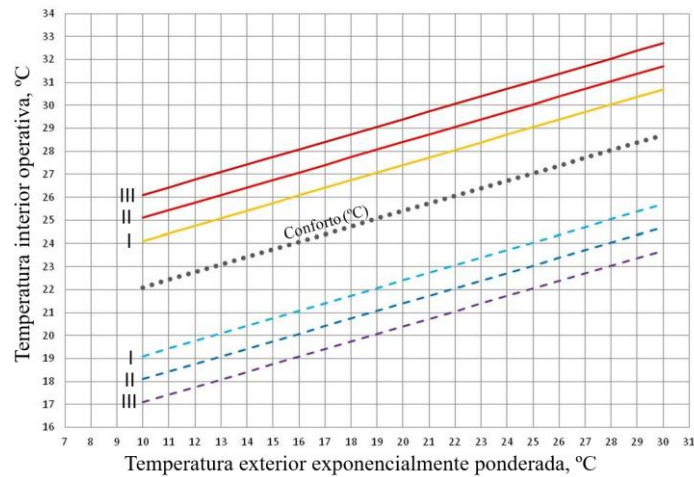


Figura 5 - Intervalos de valores recomendados da temperatura operativa interior para edifícios com ventilação natural, em função da temperatura média exterior exponencialmente ponderada [14].

Os limites para cada uma das categorias dependem da temperatura operativa interior de conforto, que é calculada através da Equação 3, e de acordo com a Tabela 2.

$$T_{op} = 0,33 \cdot T_{rm} + 18,8 \text{ (}^{\circ}\text{C)} \quad (3)$$

Em que:

- T_{op} = Temperatura operativa de conforto ($^{\circ}\text{C}$);
- T_{rm} = Temperatura exterior média exponencialmente ponderada ($^{\circ}\text{C}$).

Tabela 2 - Intervalo de temperatura de conforto associado a cada categoria [14].

Categoria I	Limite superior	+2 $^{\circ}\text{C}$
	Limite inferior	-3 $^{\circ}\text{C}$
Categoria II	Limite superior	+3 $^{\circ}\text{C}$
	Limite inferior	-4 $^{\circ}\text{C}$
Categoria III	Limite superior	+4 $^{\circ}\text{C}$
	Limite inferior	-5 $^{\circ}\text{C}$

Para calcular a temperatura exterior exponencialmente ponderada (T_{mp}), utiliza-se a Equação 4:

$$T_{mp} = (T_{n-1} + 0,8 \cdot T_{n-2} + 0,6 \cdot T_{n-3} + 0,5 \cdot T_{n-4} + 0,4 \cdot T_{n-5} + 0,3 \cdot T_{n-6} + 0,2 \cdot T_{n-7}) / 3,8 \quad (4)$$

Em que:

- T_{mp} = Temperatura exterior exponencialmente ponderada ($^{\circ}\text{C}$);
- T_{n-i} = Temperatura exterior média “i” dias anteriores ao dia atual ($^{\circ}\text{C}$).

A EN 16798 apresenta um certo conjunto de especificações para que o modelo adaptativo possa ser aplicado. Algumas dessas especificações são [14]:

1. Taxa metabólica dos indivíduos deve estar compreendida entre 1,0 e 1,3 met;
2. Não devem existir regulamentos relativos ao vestuário e os ocupantes devem ser capazes de adaptar a sua roupa consoante a sua sensação térmica, desde que seja feito num intervalo entre 0,5 e 1,0 clo;
3. A temperatura média exponencialmente ponderada deve estar compreendida entre $[10;30]$ °C;
4. Apenas podem ser usados mecanismos de ventilação mecânica de ar não-condicionado tais como ventoinhas ou persianas; podem existir sistemas de aquecimento, desde que não incluam meios de ventilação mecânica de ar tratado.

2.4. ESTUDOS REALIZADOS E VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DE CONFORTO

Han et al. [13] levaram a cabo um estudo na região centro-sul da China caracterizada por um clima quente e húmido. O estudo realizou-se nas épocas de verão de 2003 e 2004, em duas etapas distintas: a primeira passou por realizar um inquérito a 110 indivíduos e na segunda etapa realizaram-se medições em 3 divisões de 26 habitações. Os resultados do estudo demonstraram que apenas 48,2% das variáveis medidas estão de acordo com a ASHRAE 55-1992, no entanto, para indivíduos capazes de alterar e se adaptar às condições térmicas em que estão inseridos, aproximadamente 87,3% classifica o seu ambiente térmico como aceitável. O intervalo determinado para a temperatura operativa de conforto, tomando como referência o ambiente térmico aceite por 90% dos moradores, é $[22,0;25,9]$ °C. Na escala de sensações térmicas definida na ASHRAE 55 a temperatura térmica neutra está estabelecida nos 28,6 °C, mas a temperatura média indicada pelos inqueridos é de 22,6 °C (Figura 6 e Figura 7).

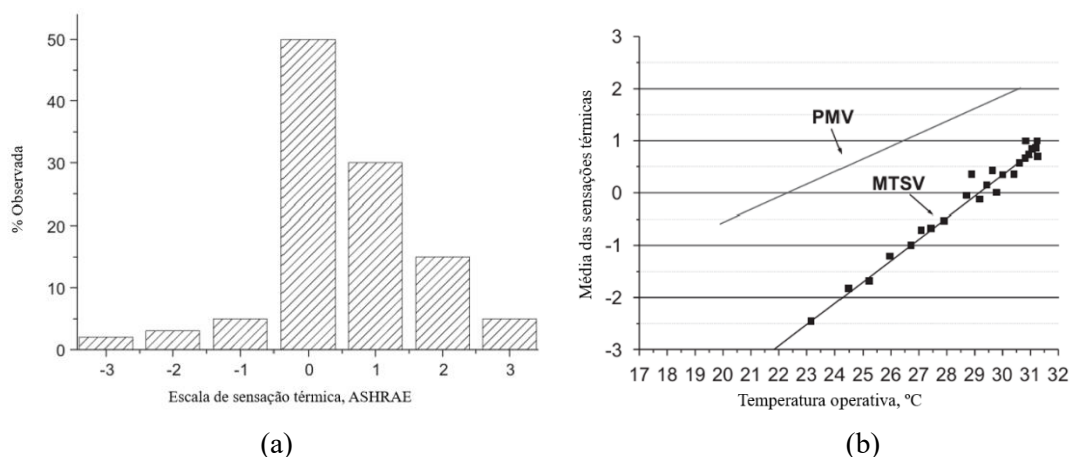


Figura 6 - Resultados do estudo de Han et al.: (a) Respostas dos intervenientes no estudo à sensação térmica; (b) Cálculo da temperatura de conforto [13].

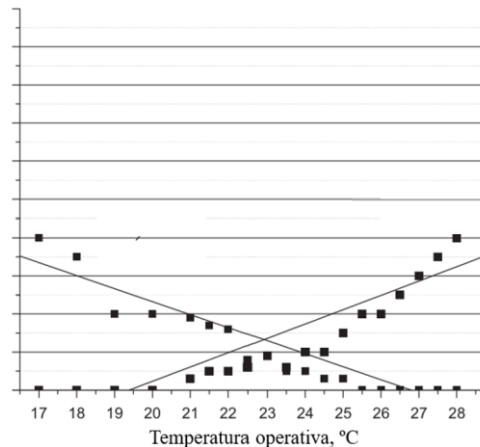


Figura 7 - Resultados do estudo de Han et al.: Cálculo da temperatura preferida [13].

Jiao et al. [6] realizaram um estudo na região de Shanghai, na China. Comparado com o estudo apresentado anteriormente, este é bastante mais recente e isso traduz-se no texto, visto que, é dada especial atenção a assuntos como desenvolvimento sustentável, redução dos consumos de energia relacionados com aquecimento e arrefecimento e otimização de ambientes térmicos interiores. A região de Shanghai é caracterizada por um clima com verões quentes e invernos frios. Este estudo englobou um total de 19 residências séniores e 64 edifícios. Numa fase inicial do estudo, foram analisadas as sensações térmicas através de inquéritos aos intervenientes no estudo e calculada a temperatura de conforto através de métodos de regressão, resultando em intervalos de:

1. [14,1-19,4] °C no Inverno;
2. [23,8-27,0] °C no Verão;
3. [20,6-31,7] °C na Meia-estação;

Numa segunda fase do estudo, foi analisado o conforto térmico adaptativo através da ASHRAE 55 e da norma EN 15251. Os resultados vieram corroborar os intervalos já calculados para as estações de Inverno e Verão, mas para a meia-estação a precisão dos modelos foi mais baixa. A análise veio também verificar que nas mesmas condições de temperatura externa, as temperaturas neutras previstas pelo modelo da EN15251 e pelo modelo da ASHRAE 55 foram mais altas do que os valores previstos pela análise de conforto térmico à meia-estação. Os resultados estão representados na Figura 8.

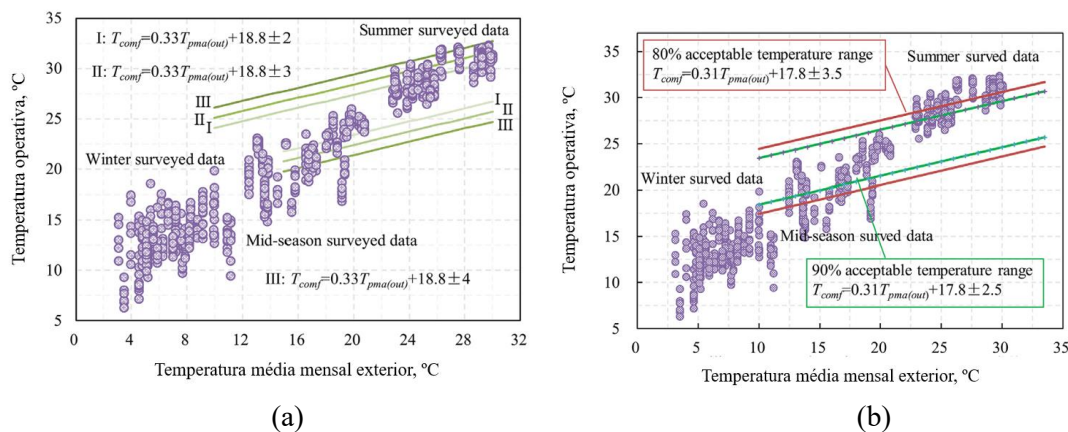


Figura 8 - Resultados do estudo de Jiao et al.: (a) Análise do conforto térmico seguindo a Norma EN15251; (b) Análise do conforto térmico seguindo a ASHRAE 55 [6].

Gong et al. [8] efetuaram a sua investigação em Guilin, China. Investigaram as possíveis correlações entre as sensações térmicas dos ocupantes e a monitorização ambiental no local sob ventilação natural, estabelecendo intervalos de temperaturas de conforto de [20,9;27,5] °C para o verão e [12,2;20,1] °C para o Inverno. Yu et al. [8] avaliaram o conforto na zona de Tibetan Plateau, China. Os resultados mostraram que a temperatura aceitável de conforto estaria compreendida entre [10,2;22,9] °C. Num estudo feito em edifícios de habitação localizados a altas altitudes na Índia verificou-se que a temperatura de conforto não estava de acordo com a norma ASHRAE 55 e, portanto, propôs-se uma gama diferente de valores para regiões com um clima frio similar [8].

2.5. IMPORTÂNCIA DE AVALIAR O CONFORTO TÉRMICO EM EDIFÍCIOS

O estudo do ambiente térmico interior é crucial porque afeta diretamente a saúde, bem-estar e produtividade do ser-humano. Por outro lado, analisando os resultados dos estudos apresentados anteriormente, pode-se concluir que, mesmo dentro do mesmo país, a sensação térmica de conforto é muito variável e nem sempre corresponde aos intervalos de temperatura definidos nas normas em vigor, o que vem realçar a importância de se investigar este fenómeno em ambientes e situações distintas.

Para além das questões anteriores, nos dias de hoje, ganhou uma importância maior porque está também relacionado com a eficiência energética e a sustentabilidade ambiental no setor da construção. Por isso, é crucial garantir um bom ambiente térmico do ponto de vista da circularidade porque permite a integração de práticas sustentáveis e eficientes em termos de recursos, contribuindo para a redução dos impactos ambientais. Com a evolução da prática da construção no sentido da circularidade e dos nZEB (near zero energy building), começou-se a dar importância a fatores como o isolamento térmico, a orientação solar de cada divisão e muitas outras questões técnicas adaptáveis ao tipo de construção e ao local em que estão inseridos. De acordo com o estudo levado a cabo por Aqilah et al. o número de estudos publicados relacionados

com conforto térmico em edifícios residenciais era praticamente nulo até 2005, tendo aumentado significativamente nos últimos anos [8].

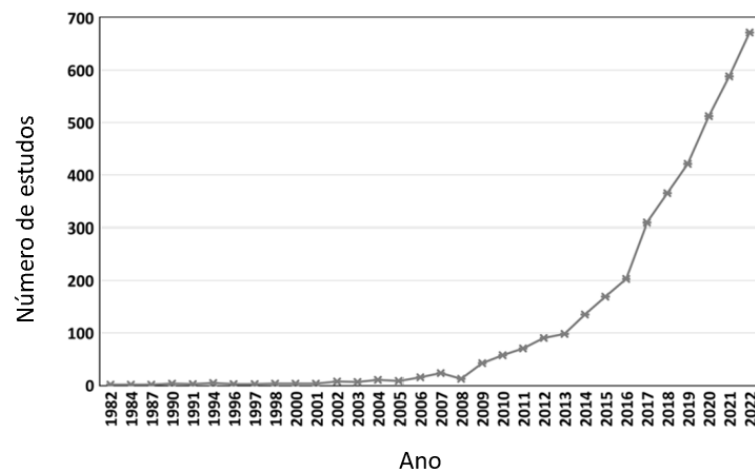


Figura 9 - Número de estudos sobre conforto térmico publicados ao longo dos anos [8].

VENTILAÇÃO

3.1. ENQUADRAMENTO

Tal como o conforto térmico, a qualidade do ar interior representa atualmente um fator crucial na conceção e construção de edifícios. Garantir taxas de renovação do ar interior suficientes é essencial para assegurar uma boa qualidade do ar interior e, igualmente essencial na melhoria das condições de saúde e de conforto das pessoas nos edifícios em que estão inseridas. Para que estes requisitos sejam cumpridos, é fulcral que o sistema de ventilação concebido para o edifício seja eficiente e adequado ao tipo de edifício e ao clima a que está sujeito. Um sistema de ventilação bem concebido e eficiente deve desempenhar várias funções, tais como [15][17]:

1. Remoção de poluentes como o CO₂, CO, formaldeídos, partículas em suspensão respiráveis, produtos de combustão, resultantes da atividade humana;
2. Controlo da humidade interior e das condensações superficiais prevenindo a formação de fungos nocivos para a saúde;
3. Renovação eficaz do ar para garantir o fornecimento de oxigénio para o interior;
4. Remoção da carga térmica e melhoria das condições de conforto no interior dos edifícios.

Um sistema de ventilação mal concebido pode provocar desconforto no ser humano devido, por exemplo, a correntes de ar e pode permitir que certos poluentes atinjam concentrações que podem pôr em risco a saúde dos ocupantes. Estudos levados a cabo comprovam que é possível que os poluentes atinjam concentrações prejudiciais para a saúde dos indivíduos, mesmo mantendo uma sensação térmica agradável. Por este motivo, na avaliação da qualidade do ar interior, existem dois tipos de critérios distintos, o primeiro consiste em criar limites para estes poluentes, para salvaguardar a saúde dos ocupantes, o segundo critério está relacionado com as sensações causadas pelos poluentes nos indivíduos [15].

Os sistemas de ventilação integrados nos edifícios de habitação, uma vez bem concebidos devem assegurar todas as funções mencionadas previamente, mas principalmente devem fornecer ar para

os aparelhos de combustão, assegurar a extração dos produtos de combustão e garantir uma boa qualidade do ar interior. Essencialmente os edifícios de habitação são constituídos por compartimentos principais (quartos e salas) e por compartimentos de serviço (cozinhas e instalações sanitárias) [16][17]. Nos compartimentos principais deve garantir-se a admissão de ar novo e nos compartimentos de serviço a extração do ar, como demonstrado na Figura 10.

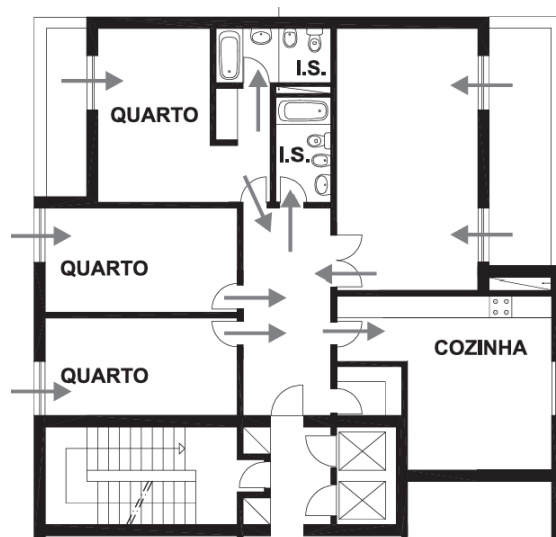


Figura 10 - Exemplo de ventilação natural de um fogo (adaptado de [20]).

Poderão definir-se 3 tipos de sistemas de ventilação: sistema de ventilação natural, sistema de ventilação mecânica e sistema de ventilação mista, que combina os dois anteriores. Na ventilação mecânica as entradas de ar ocorrem através da pressurização (pressões positivas) e a remoção do ar por despressurização (as pressões negativas) [15]. Neste tipo de sistema é usual integrar a injeção do ar nos sistemas AVAC. No caso de um sistema de ventilação natural, a renovação do ar no interior dos edifícios pode ser causada pelas pressões criadas pela ação do vento ou por diferenças de pressão originadas por diferenças na densidade do ar, devido a diferenças significativas de temperatura entre o ambiente exterior e o ambiente interior. A admissão de ar dá-se através aberturas existentes nos vãos ou na própria fachada, que devem ter área suficiente para garantir uma renovação do ar eficaz. A abertura dos orifícios para admissão do ar pode ser feita individualmente ou por um sistema de gestão do edifício [16][18]. Será dado destaque à ventilação natural e mista, visto que são os dois sistemas presentes nos casos de estudo analisados nesta dissertação.

3.2. TIPOS DE SISTEMAS DE VENTILAÇÃO

A ventilação natural baseia-se no escoamento natural do ar presente no interior dos edifícios, com recurso à ação do vento ou a diferenças de temperatura (efeito chaminé) através de aberturas permanentes ou reguláveis e concebidas corretamente para o edifício que vão integrar [19].

A ventilação natural devido à ação do vento utiliza a pressão do vento que incide sobre as fachadas do edifício para promover a circulação do ar no seu interior. Este tipo de sistema de ventilação é particularmente eficaz em regiões onde a ação do vento é constante e predominante. Quando o vento atinge a fachada de um edifício, são criadas áreas de pressões positivas no lado de barlavento (no lado que está sujeito à ação do vento) e áreas de pressões negativas no lado de sotavento (lado oposto ao lado de barlavento). São estas diferenças de pressão que provocam a infiltração e circulação do ar pelo interior do edifício [15][18].

Vários fatores contribuem para a eficácia deste tipo de sistema de ventilação, entre eles, considera-se a orientação do edifício (edifícios orientados perpendicularmente aos ventos predominantes, demonstram maior eficácia), a região climática em que está inserido o edifício e as características arquitetónicas do edifício, como a localização estratégica dos vãos exteriores e interiores, com dimensões adequadas e de fácil abertura.

A ventilação por ação do vento pode ser de duas formas [18]:

- Ventilação cruzada – Requer que exista uma diferença de pressão por ação do vento significativa para que o fluxo de ar seja suficiente para renovar o ar interior e o princípio consiste em colocar as aberturas de ventilação em lados opostos de um espaço fechado. Este tipo de ventilação cruzada é habitualmente mais adequado porque origina caudais-tipo maiores e um melhor varrimento do espaço (Figura 11a).
- Ventilação unilateral – Na ventilação unilateral as aberturas de ventilação situam-se na mesma fachada. Este método requer diferenças de pressão menores para permitir o fluxo de ar, no entanto, revela-se menos eficaz do que a ventilação cruzada (Figura 11b).

Apesar da ventilação cruzada ser mais eficaz do que a ventilação unilateral, muitas vezes a arquitetura do edifício não permite que seja integrado um sistema de ventilação cruzada devido a fatores como obstáculos, divisórias ou um elevado rácio profundidade-altura [15][18].

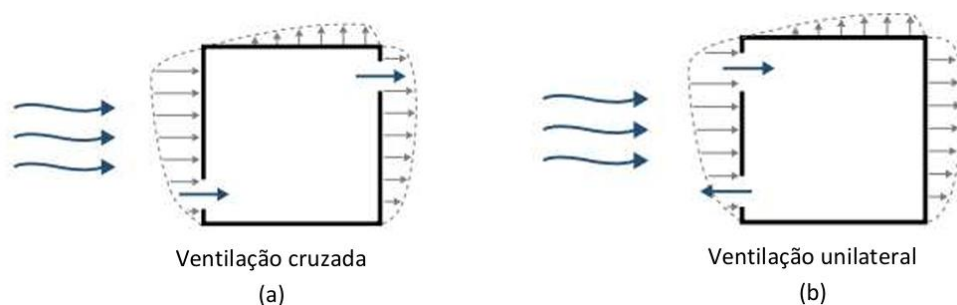


Figura 11 - Esquemas em planta dos efeitos da ventilação por ação do vento: (a) ventilação cruzada; (b) ventilação unilateral [18].

A ventilação por efeito de chaminé tem como princípio as diferenças de temperatura entre o ar exterior e o ar interior, associadas a diferenças nas massas volúmicas do ar exterior e interior, que por sua vez originam diferenças de pressão que viabilizam o fluxo de ar para ventilar o interior dos edifícios [18].

Na estação de aquecimento (inverno), as temperaturas exteriores são inferiores às temperaturas no interior dos edifícios, por isso, o ar presente no interior dos edifícios está mais quente e é menos denso, por isso, tem tendência de subir e sair do edifício pelas aberturas situadas a cotas mais elevadas. Este fenómeno cria zonas de baixas pressões nas cotas mais baixas, provocando a entrada do ar exterior pelas aberturas aí situadas e criando um fluxo de ar ascendente que faz a ventilação do edifício. Na estação de arrefecimento (verão) este fenómeno inverte-se, originando um fluxo do ar descendente como demonstrado na Figura 12 [17][18]. Quando não existe vento, este fenómeno é a única força motriz capaz de manter o fluxo de ar no interior dos edifícios [18].

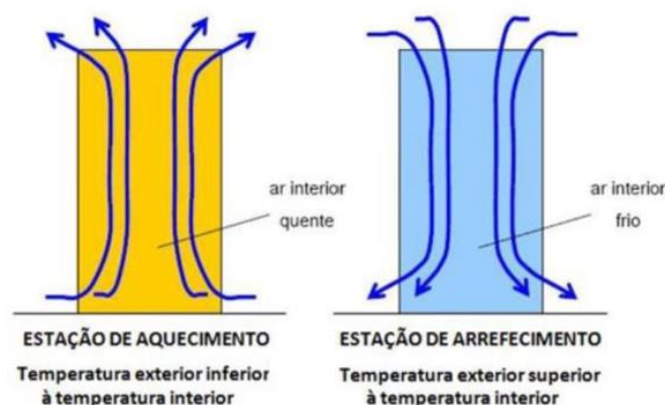


Figura 12 - Fluxo de ar consoante a temperatura [17].

Os sistemas de ventilação mista combinam a ventilação natural com a ventilação mecânica, aproveitando os benefícios de ambos os sistemas, utilizando ventilação natural continuamente e ventilação mecânica apenas quando é necessário. Por este motivo, o sistema de ventilação mista é muito eficaz. Habitualmente, os edifícios portugueses que são dotados de sistemas de ventilação mista apresentam mecanismos de extração mecânica do ar na cozinha e nas instalações sanitárias que tenham chuveiro [17][18][20]. As principais vantagens e inconvenientes da ventilação natural e mista estão resumidos na Tabela 3.

Tabela 3 - Vantagens e desvantagens dos sistemas apresentados [20].

Sistema de ventilação	Vantagens	Desvantagens
Natural	Sistema mais barato em termos de dimensionamento, instalação e manutenção. O seu funcionamento não requer consumo de energia. O seu funcionamento não emite ruídos.	Padrões de escoamento variáveis, imprevisíveis e dependentes das condições meteorológicas exteriores. Possibilidade de inversão de fluxo nas condutas, que pode influenciar negativamente a qualidade do ar interior das habitações.
Misto	Requer um menor consumo de energia do que, por exemplo, um	Maior consumo de energia e maiores custos. Provoca ruído.

	sistema de ventilação mecânica centralizado. Permite implementar maiores taxas de ventilação apenas quando é necessário.	A falta de manutenção pode ser prejudicial para a saúde dos moradores. Falta de normas para o seu dimensionamento e implementação.
--	--	--

3.3. VENTILAÇÃO E QUALIDADE DO AR INTERIOR

Quando se refere que um ambiente tem uma boa qualidade do ar interior, consideram-se duas características [20]:

1. Deve ser percecionado pelos utilizadores como fresco e agradável;
2. Não deve representar ameaças para a saúde.

Desta maneira, para avaliar a qualidade definiram-se dois critérios, o critério sensorial e o critério de saúde. O critério de saúde impõe limites máximos para a concentração dos poluentes salvaguardando a saúde, o critério sensorial é ideal para manter um ambiente agradável. Por exemplo, no caso de gases inodoros e incolores como o monóxido de carbono, que são impercetíveis ao ser humano, deve ser considerado o critério de saúde, já no caso de odores e vapores aplica-se o critério relacionado com efeitos sensoriais [15][17].

Em edifícios residenciais, os sistemas de ventilação têm como principal objetivo garantir a qualidade do ar interior, fornecer ar fresco para os aparelhos de combustão e remover os subprodutos da combustão. Este processo deve ser realizado de forma a assegurar o conforto e a segurança dos ocupantes, ao mesmo tempo que se minimiza o consumo de energia [20].

Em Portugal, estão quantificadas na NP 1037-1:2002 as exigências da ventilação através de caudais-tipo, que devem ser tidos em conta como elementos de dimensionamento e não como um valor a ser assegurado fisicamente. O caudal-tipo é então um valor determinado em função do volume de cada compartimento e das renovações mínimas do ar impostas em função do tipo de compartimento, correspondendo a uma renovação por hora nos compartimentos principais e quatro renovações por hora nos compartimentos de serviço. Os caudais-tipo mínimos a considerar estão indicados na Tabela 4 e na Tabela 5 [16].

Tabela 4 - Caudais-tipo a extrair dos compartimentos de serviço [16].

COMPARTIMENTO		VOLUME				
		$\leq 8 \text{ m}^3$	$> 8 \text{ m}^3$ $\leq 11 \text{ m}^3$	$> 11 \text{ m}^3$ $\leq 15 \text{ m}^3$	$> 15 \text{ m}^3$ $\leq 22 \text{ m}^3$	$> 22 \text{ m}^3$ $\leq 30 \text{ m}^3$
Cozinha e outros espaços para instalação de aparelhos a gás		(1)	17 l/s (60 m ³ /h)		25 l/s (90 m ³ /h)	33 l/s (120 m ³ /h)
Instalação sanitária	com banheira ou duche	13 l/s (45 m ³ /h)		17 l/s (60 m ³ /h)	25 l/s (90 m ³ /h)	(2)
	sem banheira nem duche	8 l/s (30 m ³ /h)	13 l/s (45 m ³ /h)	17 l/s (60 m ³ /h)	(2)	(2)
Espaços para lavandaria		8 l/s (30 m ³ /h)	13 l/s (45 m ³ /h)	17 l/s (60 m ³ /h)	(2)	(2)
(1) Volumes para os quais não é permitida a instalação de aparelhos a gás dos tipos A. Esta montagem é permitida para os aparelhos do tipo B desde que o local seja destinado apenas para alojamento deste (ver, também, a NP 1037-3). (2) Volumes pouco usuais em compartimentos deste tipo em relação aos quais se recomenda o dimensionamento caso a caso tendo em conta as exigências acima referidas.						

Tabela 5 - Caudais-tipo a admitir aos compartimentos principais [16].

Volume (m ³)	≤ 30	> 30 ≤ 60	> 60 ≤ 90	> 90 ≤ 120	> 120 ≤ 150	> 150 ≤ 180	> 180 ≤ 210	> 210 ≤ 240
Caudal-tipo (l/s) (m ³ /h)	8 (30)	17 (60)	25 (90)	33 (120)	42 (150)	50 (180)	58 (210)	67 (240)

3.4. MÉTODO DO GÁS TRAÇADOR

Avaliar o caudal de ventilação é essencial para garantir que um edifício possui uma renovação de ar adequada, proporcionando um ambiente interno saudável e confortável. Existem várias técnicas para medir e avaliar o caudal de ventilação, no entanto, será dado maior relevo ao método do gás traçador, por ter sido utilizado nos casos de estudo desta dissertação. Este método baseia-se na introdução de um gás traçador, que é um gás inerte e não reativo, no sistema de ventilação. A concentração desse gás é monitorada ao longo do tempo, e a taxa de decaimento da sua concentração permite calcular o caudal de ventilação [15][17].

Neste método podem ser usados vários gases (hexafluoreto de enxofre, dióxido de carbono, peróxido de azoto, perfluorbenzeno, perfluormetilbenzeno). Neste trabalho, o gás utilizado foi o dióxido de carbono, CO₂. Também existem quatro técnicas diferentes de monitorização da concentração do gás (técnica do decaimento, técnica da emissão constante, técnica do estado estacionário, técnica da emissão constante com recolha passiva), tendo sido utilizada neste trabalho a técnica do decaimento. Esta técnica consiste em injetar o gás traçador no espaço e registar as suas concentrações ao longo do tempo e, através da análise do seu decaimento, obter o valor das renovações por hora [17][18]. Para tal é utilizada a Equação 5.

$$V \frac{dc(t)}{dt} + Q \cdot c(t) = 0 \quad (5)$$

Sendo que:

- V = Volume efetivo do espaço (m^3);
- Q = Caudal de ventilação (m^3/s);
- $C(t)$ = Concentração volúmica do gás no instante t (ppm);
- t = Tempo (s).

Para representar o número de renovações do ar por hora, utiliza-se a seguinte fórmula:

$$Rph = \frac{Q}{V} = \frac{\ln \left(\frac{c(t) - c_{ext}}{c_0 - c_{ext}} \right)}{t} \quad (6)$$

Em que:

- Q = Caudal de ventilação (m^3/h);
- t = Tempo (h);
- $C(t)$ = Concentração volúmica do gás no instante t (ppm);
- C_{ext} = Concentração volúmica do gás traçador (ppm).

É habitual representar graficamente o logaritmo das concentrações de CO_2 em função do tempo e através de uma regressão linear resultante do método dos mínimos quadrados, obtém-se o valor das renovações por hora (Rph^{-1}) que corresponde ao declive da reta [18].

METODOLOGIA

4.1. ENQUADRAMENTO

O âmbito desta dissertação é caracterizar experimentalmente as condições de conforto térmico e de ventilação de edifícios de custos controlados. Através de um protocolo estabelecido com a Espaço Municipal - Renovação Urbana e Gestão do Património, tomou-se como caso de estudo 7 apartamentos de custos controlados do conjunto habitacional do Sobreiro, localizado na cidade da Maia.

O procedimento consistiu em recolher dados de temperaturas interiores e humidades relativas interiores nos compartimentos principais, com ocupação, destas residências, durante a estação de verão, outono e inverno, especificamente desde agosto de 2023 até fevereiro de 2024. A recolha de dados foi feita através da colocação de sensores de temperatura e humidade relativa no interior de cada habitação e em cada divisão a ser estudada. Através da recolha destes dados e considerando o método descrito na EN 16798:2019, é possível caracterizar o conforto térmico.

Para caracterizar experimentalmente a ventilação tipo daquele tipo de habitação, foram avaliados vários cenários num fogo com características idênticas às residências em causa, através o método do gás traçador.

4.2. CARACTERIZAÇÃO DOS CASOS DE ESTUDO

4.2.1. LOCALIZAÇÃO E CLIMA

As habitações consideradas localizam-se no conjunto habitacional do Sobreiro, na cidade da Maia, distrito do Porto. Segundo a classificação da Nomenclatura das Unidades Territoriais para Fins Estatísticos III (NUTS III), o município da Maia pertence à região da Área Metropolitana do Porto. Na Figura 13 pode ser observada a localização das residências deste caso de estudo (na R.

Picoto) e a localização da estação meteorológica onde se retiraram os dados de temperatura e humidade relativa exterior.



Figura 13 - Localização dos apartamentos em estudo e da estação meteorológica de onde foram retirados os dados de temperatura e humidade relativa exteriores [21].

Relativamente ao clima exterior, segundo a classificação de Koppen, o município da Maia situa-se numa zona de Portugal Continental cujo clima é classificado como temperado, caracterizado por invernos frios e chuvosos e verões secos e pouco quentes [23].

4.2.2. CARACTERIZAÇÃO DOS EDIFÍCIOS

Os edifícios que fizeram parte deste estudo pertencem a um conjunto habitacional de custos controlados. No total são 5 edifícios multifamiliares todos com 4 pisos (rés-do-chão elevado e 3 pisos). Em análise para este caso de estudo estiveram 7 habitações de tipologia T2, três delas situadas no rés-do-chão, uma no 1º piso, uma no 2º piso e duas no 3º piso. Todas estas habitações são iguais, com as mesmas dimensões para cada uma das divisões. Em todas as habitações foram efetuadas medições de temperatura (T) e humidade relativa (HR) na sala, no quarto com maior área e também no quarto com menor área, caso estivesse a ser utilizado. Na Figura 14 mostra-se a planta tipo das habitações e indica-se a localização genérica dos sensores nos compartimentos avaliados.

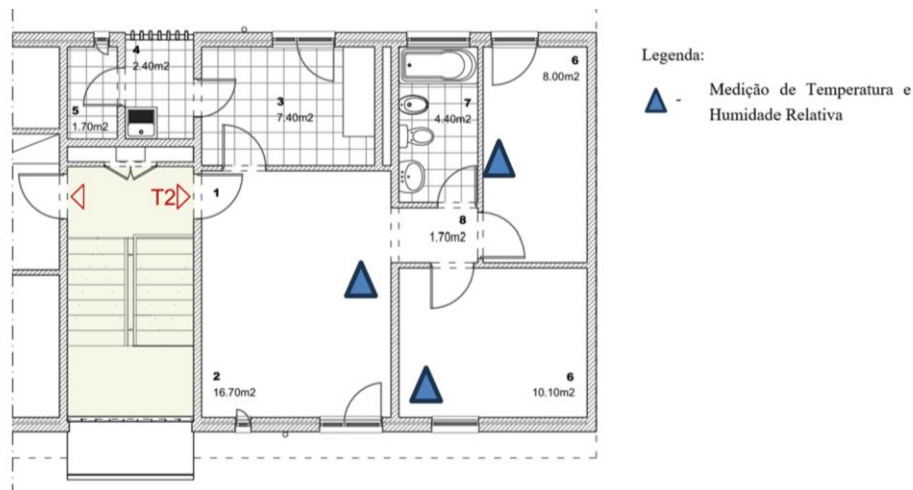


Figura 14 - Planta tipo dos apartamentos em estudo e localização genérica dos sensores de T e HR.

Os edifícios apresentam uma estrutura integral de betão armado. As fachadas são constituídas por paredes duplas com panos de blocos de betão, placas de argila expandida como isolamento térmico, espaço-de-ar e, como acabamento, reboco e pintura em ambas as faces (Figura 15). O embasamento é de betão descofrado e, ocasionalmente, as unidades de alvenaria podem ser blocos de betão leve. As empenas são em betão armado com 15 cm de espessura, rebocadas e pintadas em ambas as faces (Figura 16).



Figura 15 - Vista exterior das fachadas de um dos edifícios em estudo.



Figura 16 - Vista exterior das empenas de um dos edifícios em estudo.

As paredes interiores do tipo estruturais são de betão armado com 15 cm de espessura e as paredes interiores não estruturais são de alvenaria de blocos de betão celular autoclavado e têm 10 cm de espessura. Originalmente, todas elas foram rebocadas e pintadas, no entanto, os moradores foram, ao longo do tempo, efetuando alterações ao tipo de revestimento, aplicando ladrilhos cerâmicos principalmente nas instalações sanitárias e cozinhas. No que diz respeito aos vãos envidraçados da sala e dos quartos, a maioria ainda mantém as caixilharias originais de madeira de pinho tratada e pintada, com vidros simples e incolores. Os panos de caixilharia são maioritariamente de batente, embora na sala, no vão mais largo, que é constituído por dois panos de caixilharia, um deles é fixo e o outro é de batente. Em alguns casos, as caixilharias originais foram substituídas por outras, de alumínio anodizado, aplicadas pelos próprios moradores. Os peitoris são de betão vibrado. Os vãos envidraçados dos quartos e salas são dotados de sistemas de proteção solar, constituídos por estores exteriores de réguas de PVC de cor branca comandados pelo interior através de mecanismo de enrolar manual, instalado externamente (não embutido), com calhas laterais de alumínio anodizado. Na Figura 17 estão representados exemplos de caixilharias aplicadas na sala de três habitações diferentes, com diferentes estados de conservação.



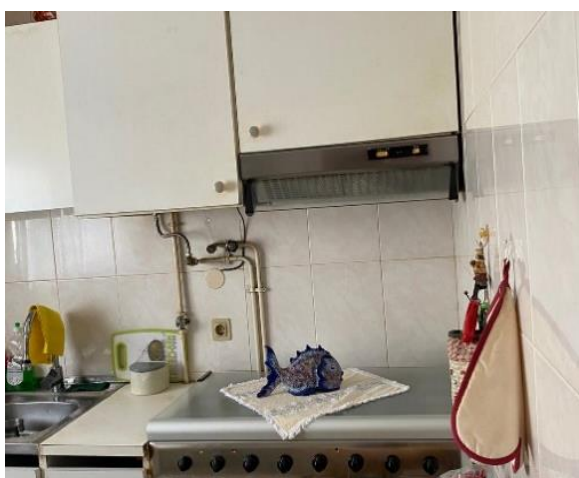
Figura 17 - Caixilharias da sala dos apartamentos estudados: (a) C-RC; (b) A-3º; (c) A-RC.

A cobertura dos edifícios é inclinada em duas águas e revestida com placas onduladas de cimento com amianto, assentes sobre estrutura de betão vibrado (Figura 18). O acesso ao desvão da cobertura é efetuado através de uma abertura no último piso da zona comum interior. A laje horizontal do desvão da cobertura não possui isolamento térmico.

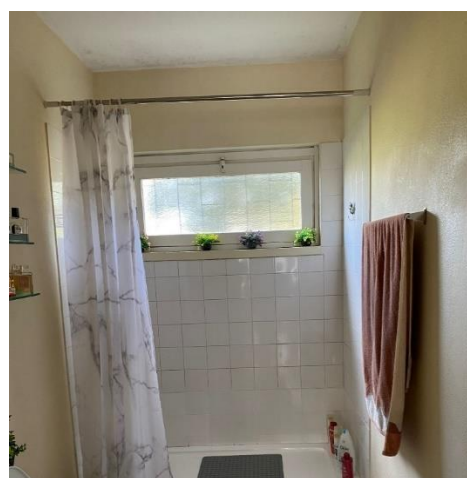


Figura 18 - Vista exterior das coberturas dos edifícios em estudo.

Os edifícios estão dotados de sistema de ventilação mecânica apenas na cozinha. A ventilação nos restantes compartimentos é efetuada através da abertura dos vãos envidraçados, incluindo as instalações sanitárias. Não existem orifícios específicos para admissão permanente de ar aos compartimentos principais nem de extração das instalações sanitárias. As cozinhas são dotadas de dispositivos de extração mecânica individuais (exaustores), de funcionamento intermitente, acionados manualmente (Figura 19).



(a)



(b)

Figura 19 - Sistema de ventilação nos compartimentos de serviço: (a) Extração mecânica na cozinha; (b) Ventilação natural por abertura das janelas nas instalações sanitárias.

4.2.3. CARACTERIZAÇÃO DAS HABITAÇÕES ESTUDADAS

Na Figura 20, pode-se observar a planta de implantação dos edifícios onde se localizam as habitações estudadas, bem como a designação atribuída a cada um deles. No edifício designado por “T” é onde se localiza o apartamento onde foi avaliada a ventilação, que se encontrava desocupado. Nos restantes, localizam-se os apartamentos onde foram efetuadas as medições de

temperatura e humidade relativa. Na Tabela 6 apresentam-se as principais características desses apartamentos.

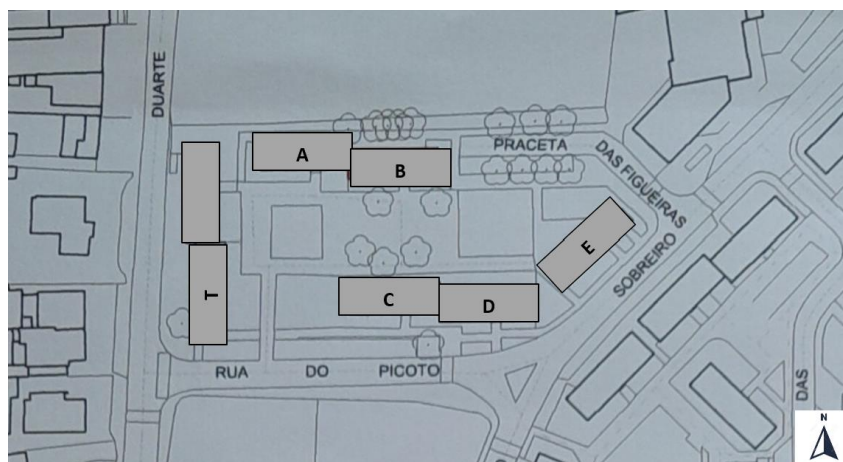


Figura 20 - Planta de implantação dos edifícios em estudo, com a designação atribuída a cada um deles.

Tabela 6 - Caracterização, por divisão, de cada uma das habitações em estudo.

	Piso	Orientação	Área divisão (m²)	Área de envidraçado (m²)	Tipo de Ventilação	Estado de Conservação da Caixilharia
A_S	R/C	Sul	16,7	1,6865	V.Mecânica Cozinha	Bom
A_Q1	R/C	Sul	10,1	0,7659	V.Mecânica Cozinha	Bom
A_Q2	3º	Sul	16,7	1,6865	V.Natural	Mau
A_S	3º	Sul	10,1	0,7659	V.Natural	Mau
A_Q1	3º	Norte	8,0	0,7659	V.Natural	Mau
B_S	R/C	Sul	16,7	1,6865	V.Mecânica Cozinha	Médio
B_Q1	R/C	Sul	10,1	0,7659	V.Mecânica Cozinha	Médio
C_S	R/C	Sul	16,7	1,6865	V.Mecânica Cozinha	Médio
C_Q1	R/C	Sul	10,1	0,7659	V.Mecânica Cozinha	Médio
C_Q2	R/C	Norte	8,0	0,7659	V.Mecânica Cozinha	Médio
C_S	2º	Sul	16,7	1,6865	V.Mecânica Cozinha	Médio
C_Q1	2º	Sul	10,1	0,7659	V.Mecânica Cozinha	Médio
C_Q2	2º	Norte	8,0	0,7659	V.Mecânica Cozinha	Médio
D_S	1º	Sul	16,7	1,6865	V.Mecânica Cozinha	Mau
D_Q1	1º	Sul	10,1	0,7659	V.Mecânica Cozinha	Mau
D_Q2	1º	Norte	8,0	0,7659	V.Mecânica Cozinha	Mau
E_S	3º	Sudeste	16,7	1,6865	V.Mecânica Cozinha	Médio
E_Q1	3º	Sudeste	10,1	0,7659	V.Mecânica Cozinha	Médio

4.3. METODOLOGIA DE ENSAIO

4.3.1. EQUIPAMENTOS

Para a caracterização do conforto térmico no interior das habitações, foram efetuadas medições de temperatura e humidade relativa na sala, no quarto principal, e, quando ocupado, no quarto de menores dimensões, sendo a localização genérica dos sensores visível na Figura 14. Foram utilizados sensores portáteis Sensirion SHT4x, com capacidade de armazenamento (Figura 21). Os sensores permaneceram na mesma posição durante todo o período de medição, sendo feitas visitas ao local para recolha dos dados a cada três meses. O posicionamento dos sensores foi cuidadosamente definido, para evitar a exposição à luz solar ou a humidade excessiva estando colocados a pelo menos 1 metro do pavimento [25].



Figura 21 - Sensor de temperatura e humidade relativa utilizado neste estudo

Estes dispositivos são portáteis e funcionam através de pilhas, e, conjuntamente com o módulo de memória interna permitem medições por períodos bastante prolongados. Através do software foi possível programá-los para efetuar medições a cada 10 minutos. Na Tabela 7 mostram-se as principais características dos sensores.

Tabela 7 - Características dos sensores de temperatura e humidade relativa [25].

Modelo	Sensirion SHT4x	
Critério	Temperatura	Humidade Relativa
Intervalo de medição	-10 °C a 60 °C	0% a 100%
Precisão	±0,1 °C	±1,5%
Resolução	0,01 °C	0,01%

Para caracterizar as condições de ventilação das habitações, foram efetuadas medições utilizando o dióxido de carbono como gás traçador. Os sensores utilizados são sensíveis à luz solar e à humidade, estando munidos de bateria a pilha e durante o período de medição devem estar colocados a uma cota igual ou superior a 1 metro pavimento. Foram usados sensores HOBO mix CO₂ logger (MX1102A), programados através do software HOBOWare, para fazer recolhas da concentração de CO₂ em intervalos de 10 minutos [24]. As principais características destes sensores são apresentadas na Tabela 8.



Figura 22 - Sensor para medição da concentração de dióxido de carbono.

Tabela 8 - Características dos sensores para medição da concentração de CO₂ [24].

Modelo	HOBO mix CO ₂ logger (MX1102A)
Critério	Dióxido de Carbono
Intervalo de medição	0 a 5000 ppm
Precisão	±50 ppm
Resolução	1ppm

4.3.2. ENSAIOS LABORATORIAIS PRELIMINARES

Para aferir o funcionamento dos sensores foram realizados ensaios preliminares em laboratório. Para os sensores de T e HR, todos os sensores foram posicionados sobre uma mesa, próximos uns dos outros, e efetuou-se uma medição de 10 em 10 minutos durante 24 horas. Os valores obtidos são os indicados na Figura 23, que mostram medições semelhantes para todos os sensores.

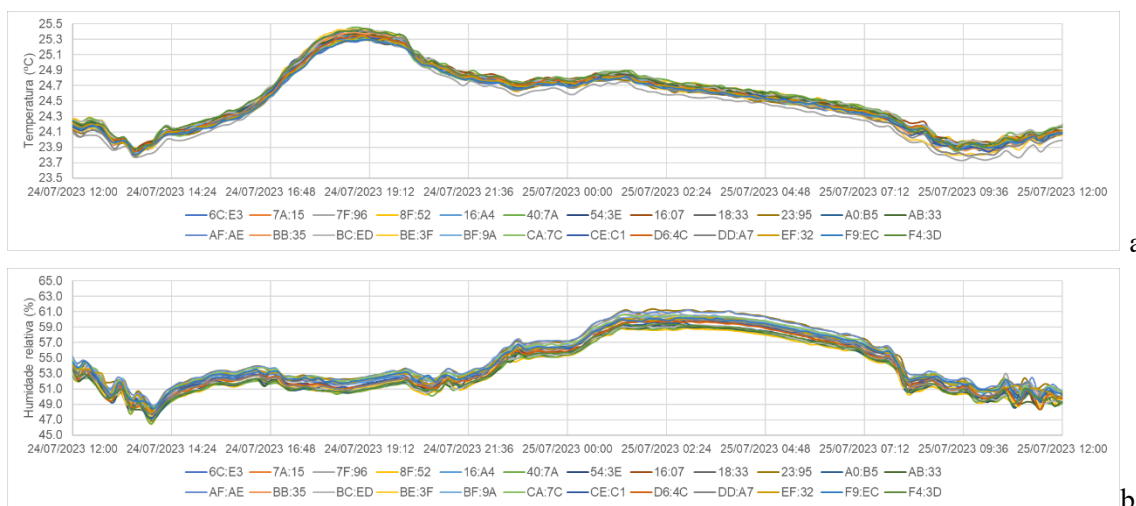


Figura 23 - Resultados da aferição relativa dos sensores de T e HR: a) Temperatura; b) Humidade relativa.

Para a aferição dos sensores que medem as concentrações de dióxido de carbono, foram realizados testes laboratoriais numa caixa de acrílico. Esta caixa de acrílico tem como objetivo simular um ambiente fechado de pequeno volume, para que a duração do teste seja menor (Figura 24). Inicialmente, é preciso calibrar os sensores para o ambiente exterior, sendo que todos devem estabilizar nos 400 ppm (valor de referência da concentração de dióxido de carbono no exterior).

Depois de calibrados, os sensores devem ser colocados na caixa de acrílico, onde se injeta uma quantidade muito pequena de gás, fechando-se imediatamente a caixa de acrílico com a ventoinha ligada durante uns minutos para uniformizar a concentração deste gás por todo o volume interior [22]. Assim que as leituras no sensor indicarem concentrações de cerca de 400 ppm, termina-se a medição, retirando-se os dados do sensor para posterior análise.



Figura 24 - Ensaio de aferição dos sensores para medição da concentração de CO₂ efetuado em laboratório.

Na Figura 25 estão representados os resultados para os três sensores usados no ensaio de aferição. Como é possível observar foi atingida uma concentração inicial superior a 5000 ppm e cerca de 2 horas depois os sensores começaram a estabilizar na concentração de CO₂ de referência, obtendo-se valores semelhantes durante o decaimento.

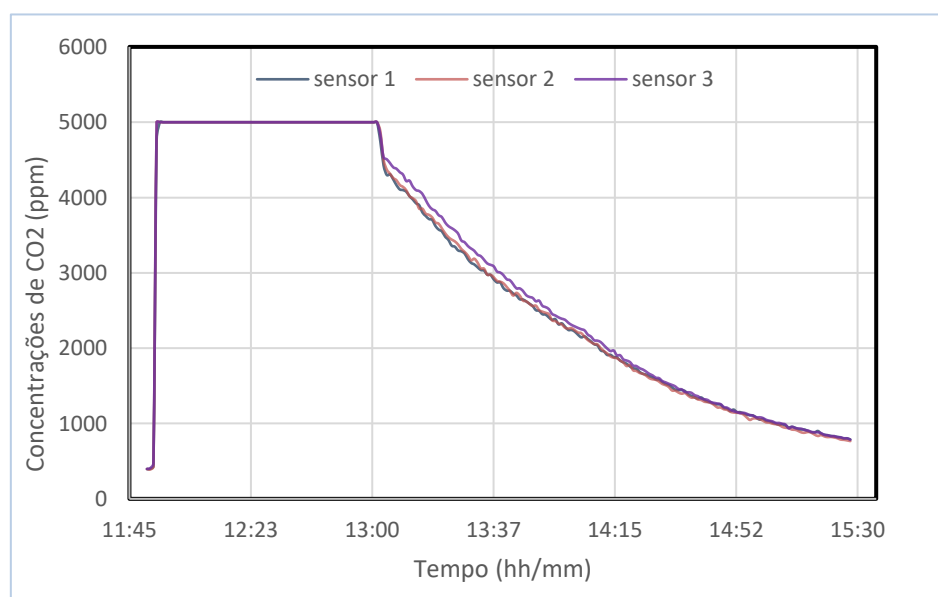


Figura 25 - Resultados da aferição relativa dos sensores de medição da concentração de CO₂.

4.3.3. CRONOGRAMA DAS AÇÕES E CONDIÇÕES DE ENSAIO

Na Tabela 9 indicam-se o número de sensores de T e HR utilizados nas habitações estudadas, localizadas nos edifícios A a E da Figura 20, bem como a respetiva localização, e duração da medição. Na Tabela 10 indicam-se os cenários considerados nos ensaios para avaliar a ventilação na habitação em estudo (edifício T da Figura 20), bem como as datas em que foram realizados. Para cada medição, utilizaram-se 2 sensores, um localizado no centro da divisão e o outro junto à janela (Figura 26).

Tabela 9 - Sensores de T e HR utilizados nas habitações estudadas (edifícios A a E da Figura 20).

Edifício	Piso	Divisão	N.º de sensores
A	R/C	Sala + Quarto 1 (maior área)	2
A	3º	Sala + Quarto 1 (maior área) + Quarto 2 (menor área)	3
B	R/C	Sala + Quarto 1 (maior área)	2
C	R/C	Sala + Quarto 1 (maior área) + Quarto 2 (menor área)	3
C	2º	Sala + Quarto 1 (maior área) + Quarto 2 (menor área)	3
D	1º	Sala + Quarto 1 (maior área) + Quarto 2 (menor área)	3
E	3º	Sala + Quarto 1 (maior área)	2
Total			18

Tabela 10 - Cenários considerados nos ensaios para avaliar a ventilação na habitação em estudo (edifício T da Figura 20).

	Manhã	Tarde
25/março/2024	Quarto 2 Todas as portas e janelas fechadas	Quarto 1 Todas as portas e janelas fechadas
26/março/2024	Sala Todas as portas e janelas fechadas	-
22/abril/2024	Quarto 2 Todas as portas e janelas fechadas	Quarto 1 Todas as portas e janelas fechadas
23/abril/2024	Sala Todas as portas e janelas fechadas	-
04/junho/2024	Quarto 1 e Quarto 2 Todas as portas e janelas fechadas	Sala Todas as portas e janelas fechadas

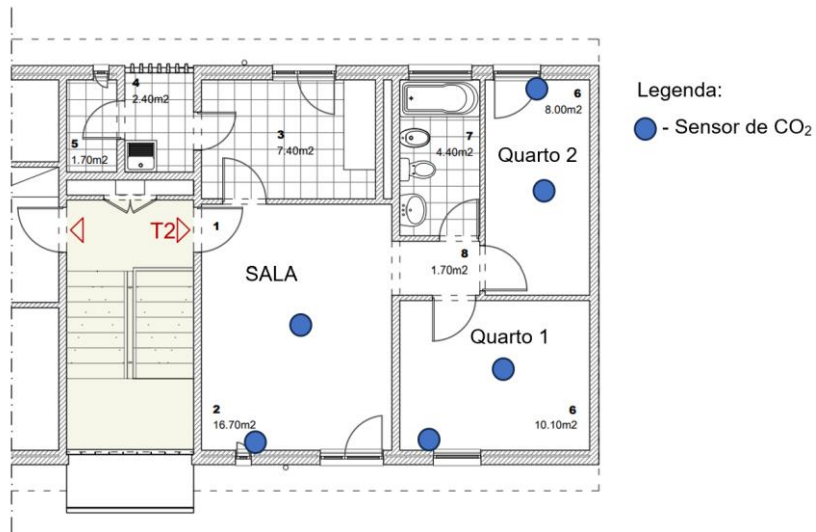


Figura 26 - Localização dos sensores de CO₂ durante os ensaios.

RESULTADOS

5.1. CONDIÇÕES HIGROTÉRMICAS

As condições higrotérmicas constituem um aspeto fundamental na criação de ambientes internos confortáveis e saudáveis. Estas condições resultam da combinação entre a temperatura e a humidade relativa num espaço. Estes fatores não influenciam apenas a sensação térmica dos ocupantes, mas também a eficiência energética dos edifícios e a durabilidade dos materiais de construção. A evolução promove o domínio deste conceito, numa sociedade cada vez mais inclinada em conceber espaços interiores cómodos e eficientes, não só por razões económicas ou ambientais, mas também por motivos de controlo de qualidade de produtos, como é o caso de caves de armazenamento de vinho.

No estudo e análise do conforto térmico de espaços interiores existe uma influência notória de fatores ambientais como a temperatura, a humidade relativa e a concentração de dióxido de carbono exteriores. Nos subcapítulos que se seguem, será feita em primeiro lugar uma caracterização das distribuições da temperatura e humidade relativa exteriores durante o período em que se efetuaram medições dentro das habitações. Como não houve a possibilidade de medir estes parâmetros por meio de um sensor, foram usados os registos da estação meteorológica de Pedras Rubras, que se situa a uma distância de 13 km do local onde ficam as habitações objeto de estudo. Numa segunda análise, foi realizada uma análise estatística descritiva das medições efetuadas nos apartamentos, com o objetivo de encontrar comportamentos similares aos quais poderemos associar um padrão. A análise estatística foi realizada por recurso ao software estatístico SPSS.

5.1.1. CONDIÇÕES HIGROTÉRMICAS EXTERIORES

Como referido anteriormente no subcapítulo 4.2.1. e no subtítulo 5.1., os dados relativos ao clima exterior foram retirados da estação meteorológica de Pedras Rubras com o objetivo de aplicar o método de análise da EN 16798, estes dados são indispensáveis para calcular a temperatura exterior exponencialmente ponderada. Nas Figuras 27 e 28 está representada a evolução da

temperatura exterior e da humidade relativa exterior, respetivamente, no decorrer do período em estudo.

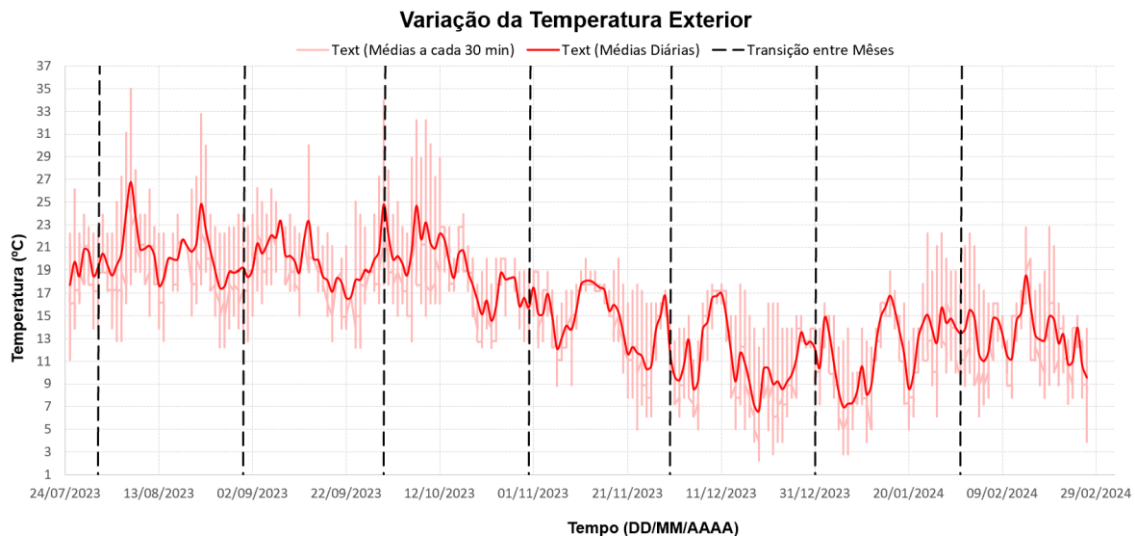


Figura 27 - Variação da Temperatura exterior durante o período de testagens.

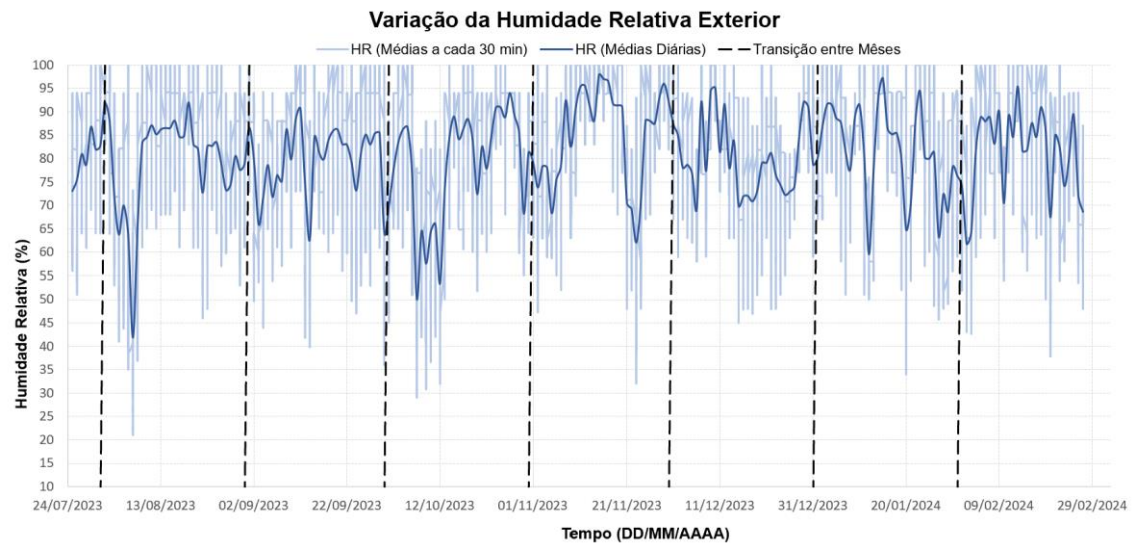


Figura 28 - Variação da Humidade relativa exterior durante o período de testagens.

Através da análise dos gráficos apresentados nas Figuras 27 e 28, é possível concluir que em 2023, a zona de Sobreiro da Maia em termos de temperatura registou um verão pouco quente com temperaturas entre os 19 °C e os 25 °C, apesar de se terem verificado alguns valores extremos de temperatura, que chegaram no máximo aos 35°C. No inverno, as temperaturas médias rondaram um intervalo entre os 5 °C e os 13 °C, sendo que o mínimo registado foi de 2 °C.

Na Figura 28 estão representados os valores de humidade relativa, onde podemos concluir que a região em estudo é bastante húmida, durante o período de medições variou maioritariamente entre

os 60 % e os 90 %, registando alguns valores mais baixos pontualmente. O mínimo medido foi de 21 % e o máximo foi de 100 %.

5.1.2. ANÁLISE ESTATÍSTICA DESCRITIVA

Como já referenciado previamente, neste subcapítulo será apresentada uma análise estatística descritiva da temperatura e humidade relativa medidos no interior das habitações. A análise destes dados foi efetuada com recurso ao software SPSS, onde por representações gráficas, medidas estatísticas e testes de normalidade se pretende analisar e comparar os diferentes ambientes térmicos existentes nos vários apartamentos em estudo.

A primeira análise a ser efetuada foi a comparação da temperatura e da humidade relativa entre as mesmas divisões de diferentes apartamentos. É importante salientar que houve perda de dados em 2 casos, no apartamento situado no 2º andar do bloco C apenas existem dados a partir de novembro, e no apartamento situado no 3º andar do bloco A houve perda de dados na Sala a partir de dezembro.

5.1.2.1. Comparação das salas entre diferentes apartamentos

Através da análise da Figura 29, podemos observar que nos meses de agosto e setembro as salas dos apartamentos que estão situados nos andares superiores apresentam temperaturas superiores aos que estão situados nos andares inferiores do edifício. Isto pode ser uma consequência direta do facto do desvão da cobertura não ser isolado termicamente, por isso, o aquecimento é provocado pela incidência direta da luz solar no telhado.

Na Figura 29 verifica-se que no mês de outubro a variação da temperatura é muito maior comparativamente aos outros meses, isto deve-se a este ser um mês de transição entre o verão e o inverno. Para além disso, também podemos especular sobre os picos de temperatura que se registam nas salas durante os meses de inverno, possivelmente devem-se ao uso de algum tipo de aparelho mecânico para aquecer o espaço, esta conclusão pode-nos providenciar uma ideia sobre que inquilinos aquecem as suas casas.

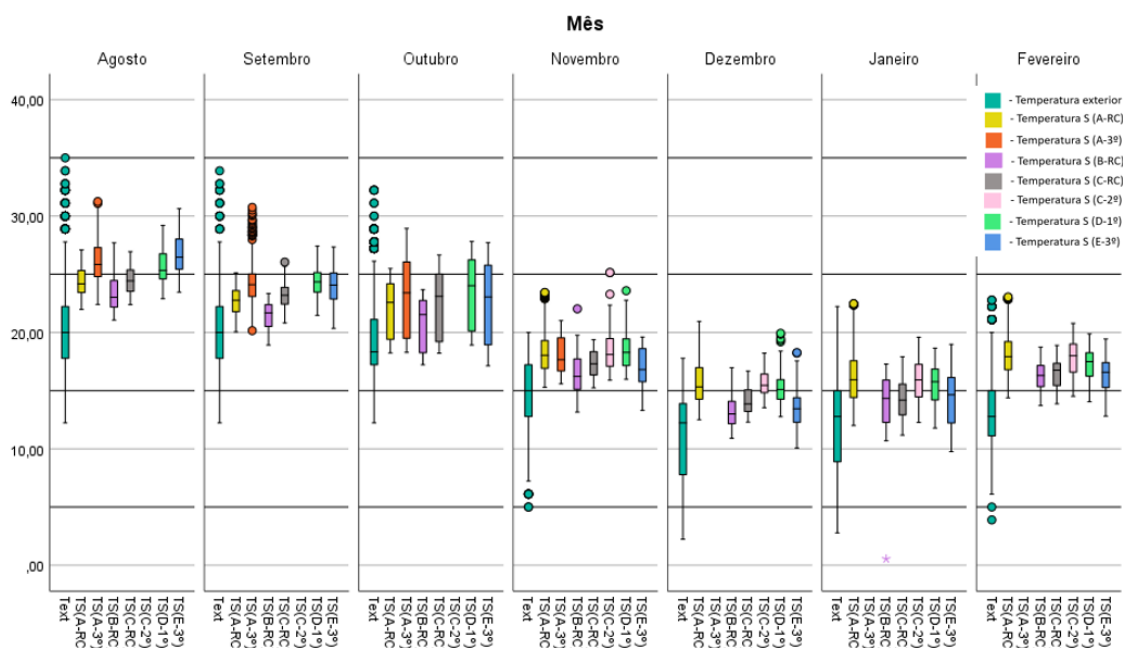


Figura 29 - Representação da distribuição da temperatura interior nas salas dos vários apartamentos e da temperatura exterior por mês.

Da observação da Figura 30 podemos validar o que já concluímos previamente, que a zona onde se localizam os apartamentos parece ser bastante húmida, registando humidades relativas exteriores muito elevadas em todos os meses, maioritariamente com valores acima dos 70 %, com pontualmente dias menos húmidos.

Através da análise das humidades relativas registadas nas salas dos vários apartamentos, há um deles que se destaca por manter valores de humidade sempre consistentes durante todo o período de testagem, O boxplot amarelo correspondente ao apartamento do bloco A no rés-do-chão (A-RC) mantém valores entre os 60 % e os 80% todos os meses, enquanto que os outros apartamentos apresentam valores semelhantes nos meses de agosto, setembro e outubro, mas a partir do mês de novembro registam sempre humidades relativas elevadas, com valores entre os 70 % e os 90 %.

É importante salientar também que o apartamento no rés-do-chão do bloco B (B-RC), representado pelo boxplot de cor roxa, regista os valores de humidade mais elevados em todos os meses de testagem, sendo a diferença mais notória nos meses de agosto, setembro e outubro.

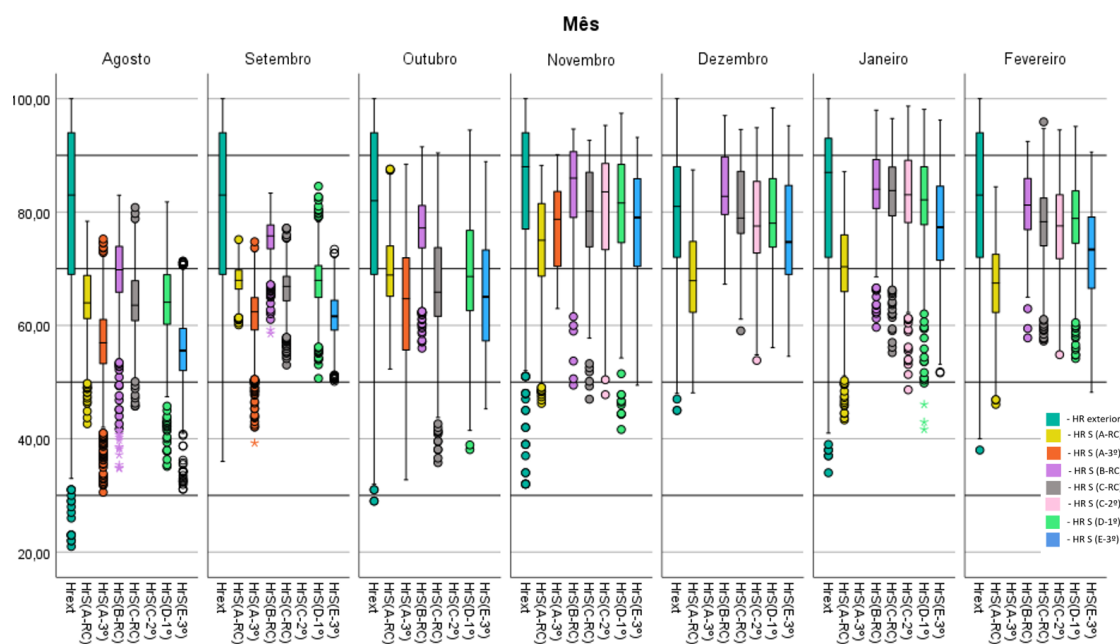


Figura 30 - Representação da distribuição da humidade relativa interior nas salas dos vários apartamentos e da humidade relativa exterior por mês.

5.1.2.2. Comparação do “Quarto 1” entre diferentes apartamentos

Através da análise do gráfico representado na Figura 31, podemos constatar que nos meses a partir de novembro, o apartamento que revela temperaturas mais baixas neste quarto é o que está situado no 3º andar do bloco E (E-3º), a razão pode estar no facto de que este é o único “Quarto 1” com uma orientação diferente da de todos os outros. O “Quarto 1” do bloco E está orientado a Sudeste por isso recebe ganhos solares uma boa parte do dia, enquanto que todos os outros estão orientados a Sul, sendo que no inverno, primavera e outono recebem luz solar durante todo o dia, mesmo apesar das orientações serem pouco diferentes é possível notar uma diferença nas temperaturas.

É relevante evidenciar também que em comparação com os boxplots das temperaturas das salas (Figura 29), existem menos apartamentos onde se registaram extremos de temperaturas mais elevadas nos meses mais frios, o que pode significar que existe uma preferência dos moradores em aquecer mais frequentemente a sala do que o quarto principal (Quarto 1).

Tal como na sala, o quarto principal do apartamento situado no 3º piso do bloco A também regista temperaturas muito elevadas nos meses mais quentes do período de testagem (agosto e setembro).

Tal como era de esperar, comparando as temperaturas da Sala e do “Quarto 1” entre apartamentos, observam-se bastante semelhanças. Isto pode dever-se à proximidade entre estas divisões e também ao facto de terem a mesma orientação solar (estas divisões estão ambas orientadas a Sul (ver Tabela 6, Secção 4.3.2).

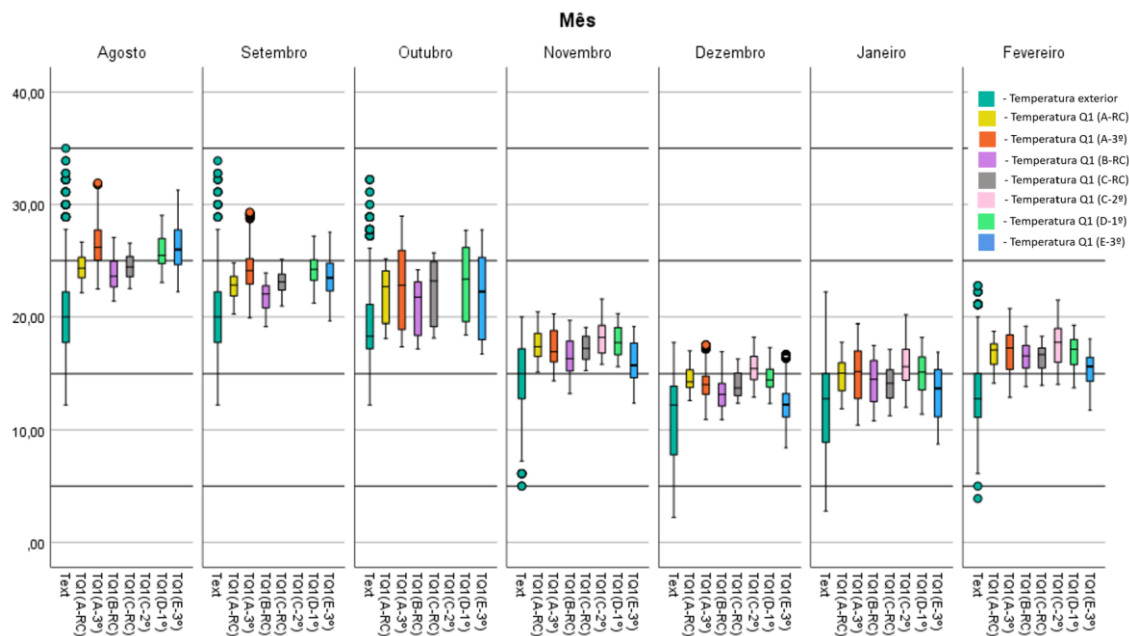


Figura 31 - Representação da distribuição da temperatura interior no quarto principal dos vários apartamentos e da temperatura exterior por mês.

Através da análise dos boxplots representados na Figura 32, repara-se que os apartamentos situados no 3º piso (boxplots cor de laranja e azul) tendem a evidenciar humidades relativas mais baixas do que os outros apartamentos nos meses mais quentes. Salientado o facto de que o apartamento do 3º piso do bloco A (A-3º) mantém-se como detentor do apartamento com as humidades mais baixas durante todo o período de testagem.

Comparando as humidades relativas entre a Sala e o “Quarto 1” de cada apartamento, não se observa o mesmo que aconteceu com as temperaturas, existem algumas diferenças em termos de valores de humidade das duas divisões, para além de que o apartamento representado pelo boxplot amarelo (A-RC) não mantém a consistência que demonstrava na sala, registando valores de humidade mais elevadas nos meses mais frios do período de testagem, tal como todos os outros apartamentos.

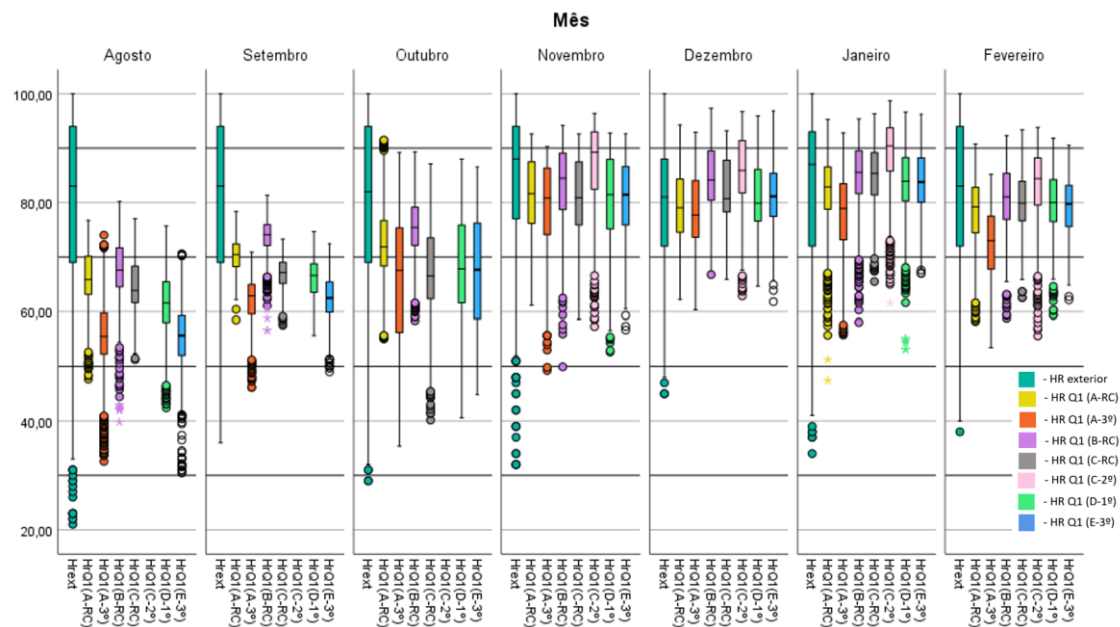


Figura 32 - Representação da distribuição da humidade relativa interior no quarto principal dos vários apartamentos e da humidade relativa exterior por mês.

5.1.2.3. Comparação entre o “Quarto 2” entre diferentes apartamentos

Na Figura 33 estão representadas as distribuições das temperaturas nos “Quarto 2” com ocupação nos apartamentos em estudo (este quarto não tem ocupação em todos os apartamentos). Pelos boxplots pode-se observar similaridades entre as temperaturas registadas no “Quarto 2” dos vários apartamentos, que são também bastante parecidas com as temperaturas registadas nas outras divisões onde se efetuou recolha de dados (Figura 29 e Figura 31). Mais uma vez o apartamento (A-3º) regista picos de temperatura bastante elevada nos meses mais quentes do período de estudo.

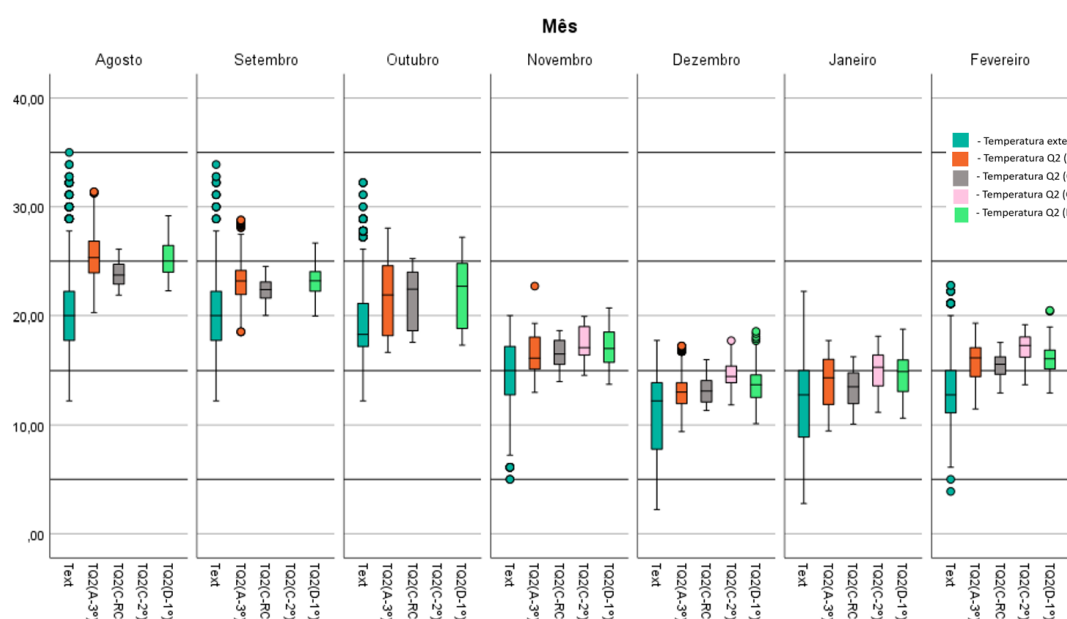


Figura 33 - Representação da distribuição da temperatura interior no quarto secundário dos vários apartamentos e da temperatura exterior por mês.

Como é possível observar na Figura 34, as distribuições da humidade registada no “Quarto 2” dos vários apartamentos demonstram ser bastante similares, sendo que todos os apartamentos registam valores de humidade quase sempre superior a 80% nos meses de maior pluviosidade (novembro, dezembro e janeiro).

Também é importante salientar que o apartamento A-3º identificado pelo boxplot cor-de-laranja regista os valores mais baixos de humidade durante todos os meses de testagem, sendo mais uma vez, tal como aconteceu no “Quarto 1”, a diferença mais significativa nos meses mais quentes do período de testes.

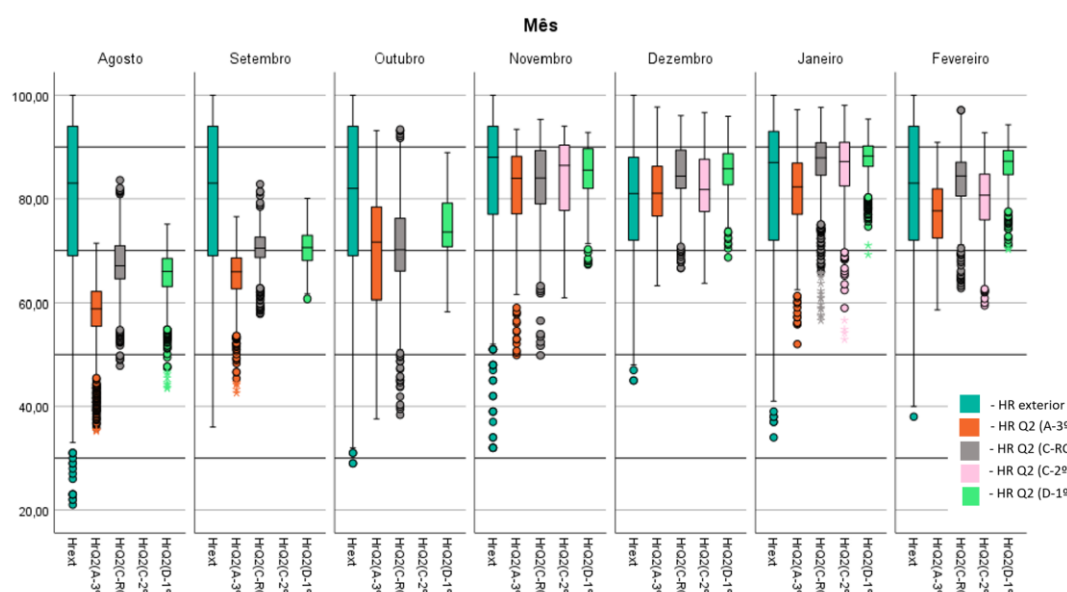


Figura 34 - Representação da distribuição da humidade relativa interior no quarto secundário dos vários apartamentos e da humidade relativa exterior por mês.

5.1.2.4 Comparação entre o apartamento do rés-do-chão e o do 3º do bloco A

O objetivo desta análise é comparar a temperatura e humidade relativa entre um apartamento situado no piso à cota mais baixa com um apartamento situado à cota mais alta do mesmo edifício.

Da análise da Figura 35 pode-se verificar que o apartamento localizado no 3º piso regista temperaturas mais elevadas e picos de temperaturas mais elevadas nos meses mais quentes. Tal fenómeno pode-se dever ao facto de no piso mais elevado os apartamentos estarem sujeitos à incidência de luz solar na cobertura do edifício, para além de que nestes edifícios, como já foi referido previamente, o desvão da cobertura não foi isolado termicamente. Esta falta de isolamento térmico na cobertura também vai potenciar perdas de calor pela cobertura nos meses mais frios.

Para além disto, o apartamento no 3º piso regista as temperaturas mais baixas nos meses mais frios. Este facto pode ser devido a vários fatores, tais como: maior degradação dos materiais de construção no apartamento do 3º andar, remodelação do apartamento no rés-do-chão, ou, simplesmente os inquilinos do apartamento no rés-do-chão recorrerem a algum tipo de aquecimento mecânico para aquecer a sua casa durante os meses mais frios.

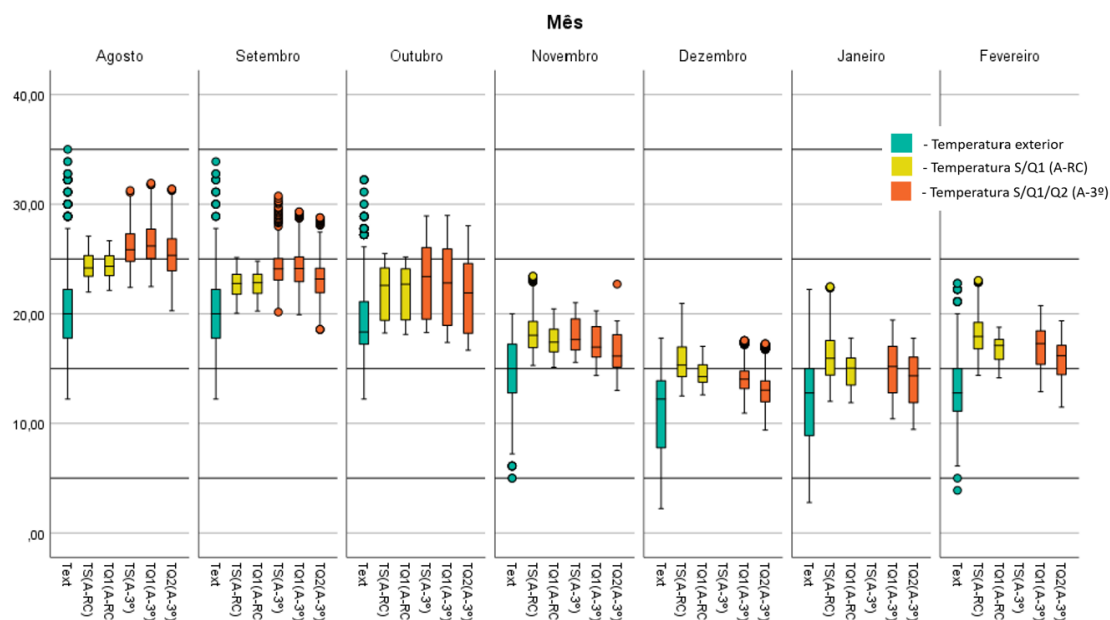


Figura 35 - Representação da distribuição da temperatura interior entre o apartamento A-RC e A-3º.

Analisando a Figura 36, podemos corroborar as diferenças que existem na humidade relativa entre as divisões de um mesmo apartamento, mencionadas previamente no subcapítulo 5.1.2.2.

Pela Figura 36 é evidente que o apartamento no 3º piso regista humidades significativamente mais baixas que o apartamento do rés-do-chão durante os três meses iniciais deste caso de estudo. No caso dos meses mais frios, os valores entre divisões do mesmo tipo, neste caso apenas o “Quarto 1”, revelam semelhanças entre estes dois apartamentos.

Existe uma observação mais notória que deve ser salientada, que é o facto de nos meses frios existir uma diferença muito significativa na humidade relativa registada nas divisões do apartamento do rés-do-chão (boxplot amarelo), esta diferença pode residir no facto do “Quarto 1” desta habitação estar mais sujeito a infiltrações de água do que a sala, seja na fachada seja no teto ou paredes interiores.

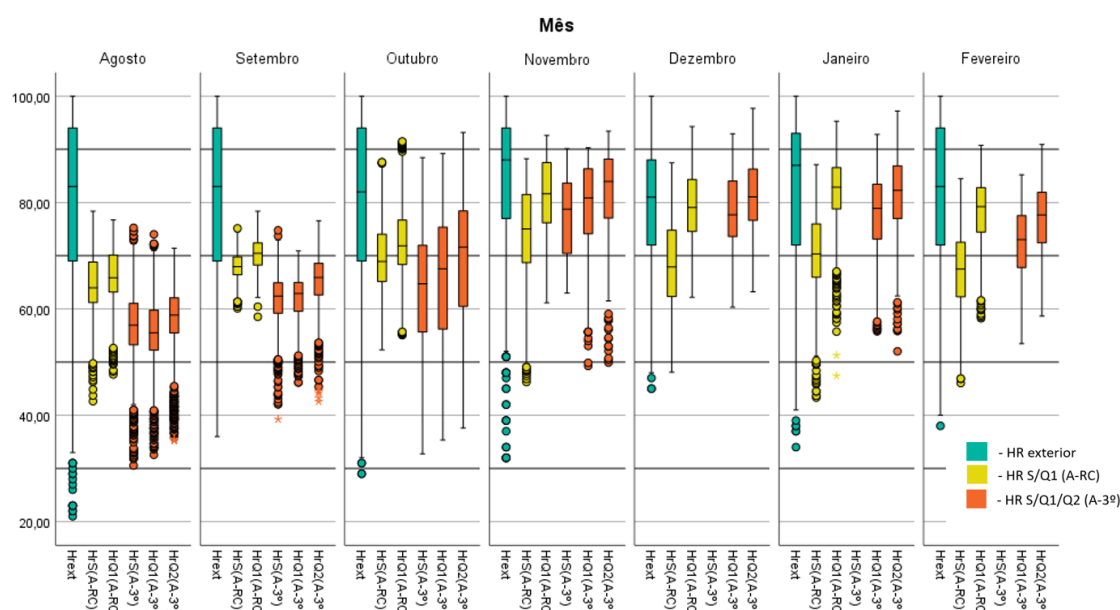


Figura 36 - Representação da distribuição da humidade relativa interior entre o apartamento A-RC e A-3º.

5.1.2.5. Comparação entre um apartamento do rés-do-chão e do 3º piso com orientações diferentes

A comparação entre os apartamentos do rés-do-chão do bloco A e do 3º piso do bloco E visa, entre outros, identificar padrões de temperatura que possam ser associados às diferentes orientações solares destes dois apartamentos. Como está representado na Tabela 6 (Secção 4.2.3.), a sala e o “Quarto 1” do apartamento do bloco A estão orientadas para Sul enquanto que os do apartamento do bloco E estão orientados a Sudeste. Assim, no inverno, as divisões orientadas a sul terão um maior aproveitamento solar que o que está orientado a sudeste, resultando em temperaturas mais baixas nas habitações do bloco E durante os meses mais frios do período de testes, como é possível observar pelos boxplots representados na Figura 37.

Durante o período mais quente do período de testagem, o apartamento situado imediatamente abaixo da cobertura revela temperaturas mais elevadas comparativamente às do rés-do-chão. Como já foi referido previamente, este facto é uma consequência direta do desvão da cobertura não ser isolado termicamente.

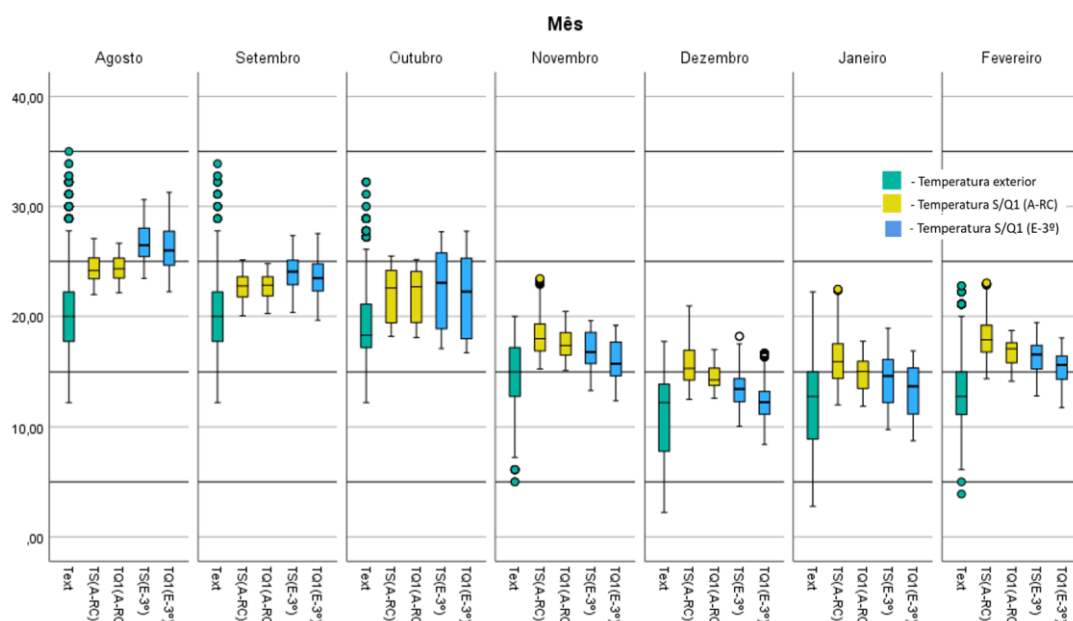


Figura 37 - Representação da distribuição da temperatura interior entre o apartamento A-RC e E-3º.

Passando agora para a análise da humidade relativa registada nestes apartamentos, verificamos que, como já havíamos reparado anteriormente, o apartamento situado imediatamente por baixo da cobertura regista humidades significativamente mais baixas nos meses mais quentes. Nos meses mais frios, todos os apartamentos registam humidades relativas idênticas e bastante elevadas (entre os 70 % e os 90 %), apenas há uma exceção, que ocorre na sala do apartamento do rés-do-chão do bloco A (representado pelo boxplot amarelo mais à esquerda), que apresenta valores de humidade relativamente inferiores aos medidos na divisão da sala de outros apartamentos.

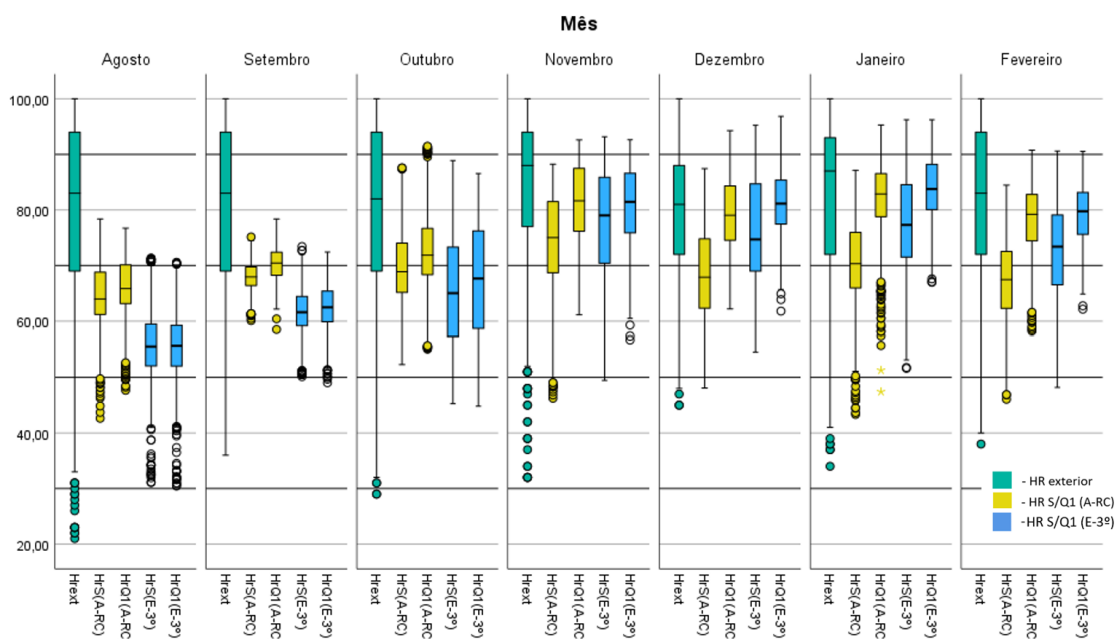


Figura 38 - Representação da distribuição da humidade relativa interior entre o apartamento A-RC e E-3º.

5.1.3. APLICAÇÃO DE TESTES ESTATÍSTICOS

O teste de Kolmogorov-Smirnov (K-S) é um teste estatístico usado para ajustar dados amostrais a uma distribuição de probabilidade. Aplicou-se este teste para avaliar a normalidade das variáveis em estudo, temperatura e humidade relativa. O teste inicia-se com a criação de duas hipóteses:

- H_0 : a amostra segue uma distribuição normal;
- H_1 : a amostra não segue uma distribuição normal.

Em todos os testes estatísticos aplicados considerou-se o nível de significância de 5%. Após aplicar o teste a todos os dados amostrais por apartamento, verifica-se que o valor de significância (valor de p) obtido é sempre inferior a 0,001, O que significa que rejeitamos a hipótese nula (H_0), ou seja, concluímos que nenhuma das variáveis segue uma distribuição normal, admitimos como correta a H_1 .

Uma vez concluída que nem a temperatura nem a humidade seguem a distribuição Normal, foi aplicado um teste não paramétrico (teste de Wilcoxon) para comparar e identificar semelhanças entre duas amostras relacionadas. Com o objetivo de identificar casos em que existam semelhanças entre as temperaturas e/ou humidades entre divisões da mesma habitação, foram analisados os dados relativos aos apartamentos e os resultados estão expostos na Tabela 11, comparando a temperatura e humidade relativa entre diferentes divisões do mesmo apartamento e entre diferentes apartamentos.

Tabela 11 - Resultados do teste de Wilcoxon aplicado aos vários apartamentos em estudo.

	TS-TQ1	TS-TQ2	TQ1-TQ2	HRS-HRQ1	HRS-HRQ2	HRQ1-HRQ2
A-RC	$p<0,001$			$p<0,001$		
A-3º	$p<0,001$	$p<0,001$	$p<0,001$	$p<0,001$	$p<0,001$	$p<0,001$
B-RC	$p<0,001$			$p<0,001$		
C-RC	$p<0,001$	$p<0,001$	$p<0,001$	$p<0,001$	$p<0,001$	$p<0,001$
C-2º	$p<0,001$	$p<0,001$	$p<0,001$	$p<0,001$	$p<0,001$	$p<0,001$
D-1º	$p<0,001$	$p<0,001$	$p<0,001$	$p<0,653$	$p<0,001$	$p<0,001$
E-3º	$p<0,001$			$p<0,001$		

Da análise dos resultados (Tabela 11), podemos concluir que apenas a Humidade Relativa da sala e do quarto principal no apartamento do 1º piso do edifício D são estatisticamente iguais (valor

de $p=0,653 > 5\%$). Nos restantes casos, estatisticamente, existem diferenças científicas entre as amostras ($p < 0,001$). Contudo do ponto de vista do desempenho dos edifícios as diferenças não são muito relevantes.

5.2. AVALIAÇÃO DO CONFORTO

5.2.1. TEMPERATURA INTERIOR

5.2.1.1. Apartamento no rés-do-chão do edifício A

Na Figura 39 estão expressos os limites de conforto térmico calculados de acordo com a EN 16798 (lim inferior e lim superior) bem como a variação da temperatura exterior (Text), a variação da temperatura da sala (TintSala) e do quarto principal (TintQ1).

A temperatura máxima durante todo o período de medições neste apartamento foi observada na divisão da sala e correspondeu a um valor de 27 °C, a temperatura mínima medida foi de 11° C tanto na sala como no quarto principal. No caso das temperaturas exteriores, a máxima medida correspondeu a 35°C e a mínima foi de 2°C. Verifica-se então que a diferença entre as temperaturas máximas foi de 8 °C e entre as temperaturas mínimas foi 9 °C, o que significa que, em média, a diferença entre a temperatura interior e exterior é um valor compreendido entre 8 °C e 9 °C.

Os limites da temperatura vão variando ao longo do tempo, são calculados de acordo com a norma EN 16798 e dependem das médias das temperaturas exteriores dos últimos 7 dias. Para se considerar que existe conforto térmico, as temperaturas interiores devem estar compreendidas entre o limite superior e o limite inferior. Através da observação da Figura 39, podemos concluir que este apartamento apresenta bons resultados nos meses mais quentes, no entanto, quando começam a baixar as temperaturas exteriores o comportamento do edifício é precário. Para resumir, durante os meses de agosto, setembro e meados de outubro as temperaturas interiores situam-se dentro dos limites estabelecidos pela norma, no entanto, a partir do meio do mês de outubro as temperaturas registadas são quase sempre inferiores ao limite inferior estipulado pela norma.

Como é possível observar no gráfico 39, as medições efetuadas na sala a partir do meio do mês de novembro apresentam muita variabilidade, o que sugere que os inquilinos utilizem meios de aquecimento nesta divisão. No quarto principal não existem indícios de que exista algum tipo de aquecimento mecânico.

O edifício A é idêntico aos outros em termos de técnicas e materiais de construção, localização e orientação (exceto o edifício E). Por isso, qualquer diferença que exista reside na utilização que lhe é dada pelos seus ocupantes, a manutenção aplicada e a correta ventilação do espaço. Em termos de orientação, tanto a sala como o quarto estão orientados a Sul, o que no Inverno garante um aproveitamento da luz solar durante o dia inteiro.

Apesar da temperatura interior não estar conforme os limites da norma, este apartamento apresenta sempre temperaturas bastante razoáveis no inverno, que estão compreendidas maioritariamente entre os 15 °C e os 20 °C. Para além de apresentar um ótimo desempenho no verão em que regista temperaturas maioritariamente entre os 20 °C e os 25 °C.

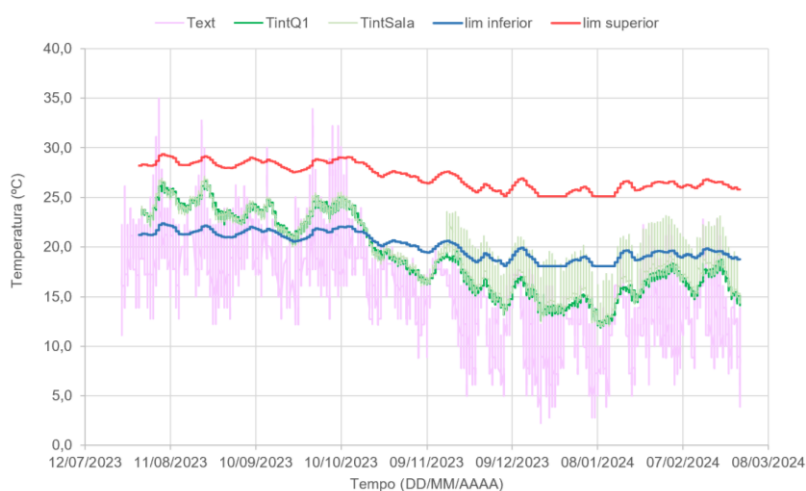


Figura 39 - Variação dos limites de conforto e da temperatura interior e exterior ao longo do tempo (A-RC).

5.2.1.2. Apartamento no 3º piso do edifício A

Na Figura 40 estão representadas as temperaturas exterior e interior da sala e de ambos os quartos do apartamento A-3º, assim como os respetivos limites ao longo do tempo calculados com recurso à EN 16798. No caso deste apartamento existiu uma ligeira perda dos dados relativos às medições efetuadas na sala a partir de meados do mês de novembro.

Como podemos observar na Figura 40, e comparando com a Figura 39, este apartamento registou temperaturas mais elevadas do que o apartamento anterior. Nos meses mais quentes, salvo algumas pequenas exceções, apresentou sempre temperaturas aceitáveis pela norma EN 16798, no entanto já foram observadas temperaturas entre os 25 °C e os 30 °C. Esta subida na temperatura poderia ser um fator benéfico se quando a temperatura exterior baixasse, se mantivessem temperaturas razoáveis no interior. No entanto, não é esse o caso e a queda de temperatura no inverno consegue ser mais drástica do que no apartamento do rés-do-chão deste mesmo edifício. No inverno as temperaturas interiores são quase sempre inferiores ao limite estipulado pela norma, e registam vários valores já abaixo dos 15 °C.

Neste apartamento, a temperatura interior mínima registada foi de 32 °C no quarto principal e a mínima foi 9 °C no quarto 2. Ao compararmos com as temperaturas máximas e mínimas exteriores, verificamos que a variação de temperatura entre o interior e o exterior está entre os 3 °C e os 7 °C.

Uma possível explicação para os extremos de temperaturas que se fazem notar nesta habitação, já mencionada anteriormente na análise estatística, é o facto deste apartamento se situar no 3º piso, imediatamente por baixo da cobertura, e esta não ser isolada termicamente. Ou seja, no verão a incidência constante do sol na cobertura provoca o aumento da temperatura interior e comparando com os outros apartamentos. No inverno, os apartamentos situados nos últimos pisos detêm uma face extra, não isolada que é a cobertura, por onde se infiltra o ar frio nos meses mais frios.

Para além do facto da cobertura não ser isolada, este apartamento em específico chamou à atenção pelo nível de degradação das caixilharias, principalmente da sala (ver Figura 17 (b)).

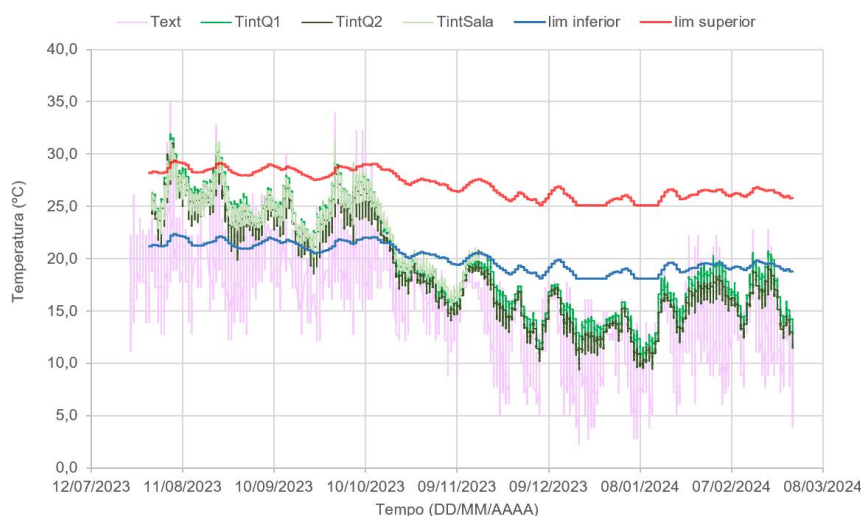


Figura 40 - Variação dos limites de conforto e da temperatura interior e exterior ao longo do tempo (A-3º).

5.1.2.3. Apartamento no rés-do-chão do edifício B

Na Figura 41 estão representadas as temperaturas interiores observadas no apartamento do rés-do-chão pertencente ao edifício B. Este edifício está encostado ao edifício A, tem as mesmas dimensões, a mesma orientação e os materiais usados nas suas construções foram os mesmos também.

Como podemos analisar através da Figura 41, no apartamento B-RC a temperatura interior varia de forma bastante similar ao apartamento A-RC. O que era de esperar, visto que estão localizados à mesma cota, os únicos fatores que poderiam provocar diferenças seria a existência de diferenças no estado de conservação das caixilharias ou portas. Como podemos observar pela Figura 17 (a) e (c) que representam, respetivamente, os vãos envidraçados da sala dos apartamentos B-RC e A-RC, encontram-se ambos razoavelmente conservados.

Podemos concluir, que as habitações sociais que tomaram parte neste estudo para avaliar o conforto térmico, revelam uma tendência para cumprir os limites de referência nos meses de verão, mantendo as casas com temperaturas mais amenas. No entanto, no inverno revelam-se

bastante ineficazes em manter temperaturas que cumpram a norma, registrando sempre valores de temperaturas interiores que se situam abaixo do limite imposto pela norma. Este apartamento e o do rés-do-chão analisado anteriormente apresentam variações de temperatura muito parecidas e diferentes das registadas pelo apartamento que está no 3º piso. Por isso, podemos já especular que a diferença entre eles advém do piso em que estão inseridos.

Nesta habitação o valor máximo de temperatura foi registado na sala e correspondeu a um valor de 28 °C e o mínimo foi também na sala e correspondeu a cerca de 10 °C. Fazendo a habitual comparação com os máximos e mínimos exteriores, concluímos que a diferença entre as temperaturas máximas é de 7 °C e entre as temperaturas mínimas é de 8 °C. Tal como no apartamento localizado no rés-do-chão analisado anteriormente (A-RC), as diferenças entre as temperaturas interior e exterior são semelhantes.

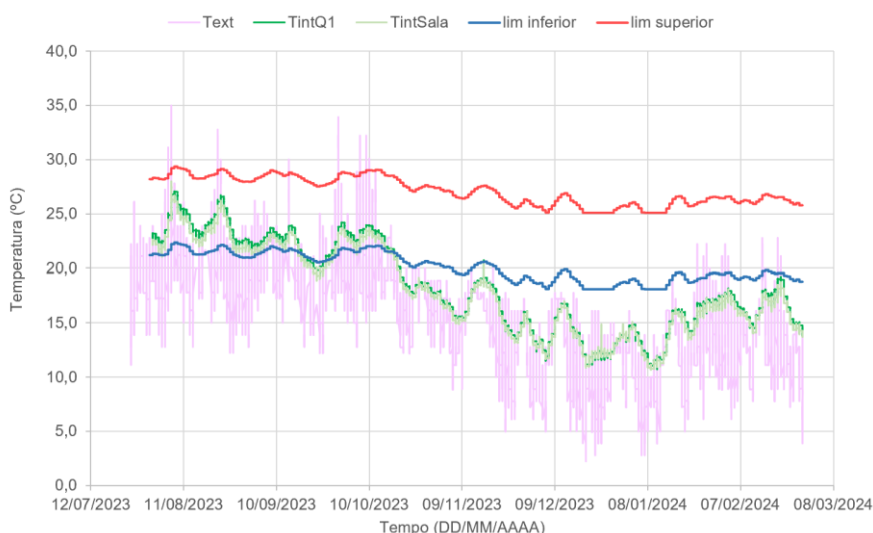


Figura 41 - Variação os limites de conforto e da temperatura interior e exterior ao longo do tempo (B-RC).

5.1.2.4. Apartamento no rés-do-chão do edifício C

Os gráficos relativos aos apartamentos localizados no rés-do-chão mostram-se caracterizados por temperaturas dentro dos limites de conforto nos meses mais quentes, sendo que as temperaturas interiores estão mais perto do limite inferior. Tal como todos os outros apartamentos em estudo, nos meses de inverno, a temperatura interior revela-se inferior ao limite imposto pela norma. Desta forma, temos um gráfico bastante semelhante aos apresentados nos subcapítulos 5.1.2.1 e 5.1.2.2.

Através da análise dos resultados obtidos para a variação da temperatura interior, verificou-se um valor máximo de 27 °C na sala e um valor mínimo de 10 °C no quarto com menor área. A diferença entre a temperatura máxima e mínima registada entre o interior e o exterior, foi de 8 °C para ambas as situações.

Pela observação da Figura 42, verifica-se nos meses mais quentes uma variação da temperatura interior entre os 20 °C e os 27 °C. Nos meses em que a temperatura exterior é mas baixa, a temperatura interior dos apartamentos acompanha este fenómeno, sendo que se registaram temperaturas entre os 10 °C e os 18 °C.

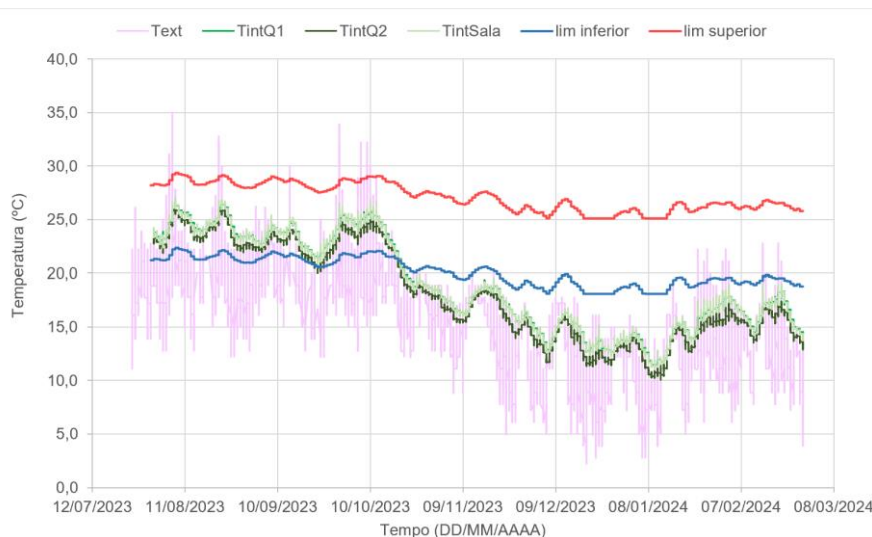


Figura 42 - Variação dos limites de conforto e da temperatura interior e exterior ao longo do tempo (C-RC).

5.1.2.5. Apartamento no 2º piso do edifício C

No apartamento localizado no 2º piso do edifício C apenas existe registo de temperaturas interiores a partir do dia 7 de novembro, os dados anteriores a esta data foram dados como perdidos.

No caso desta habitação no 2º piso, a variação da temperatura interior registada foi entre 11 °C e 27 °C, sendo a temperatura mínima observada no quarto com menos área e a temperatura máxima na sala. Mais uma vez, as diferenças entre as temperaturas máximas e mínimas interior e exterior rondou os 8 °C.

A análise das curvas de variação da temperatura interior das várias divisões, demonstra que nos meses de inverno, este apartamento apesar de não cumprir com o limite inferior de conforto imposto pela norma, é o apartamento que apresenta temperaturas mais próximas do limite inferior. Pela análise das variações de temperatura diárias neste apartamento, é importante salientar que apresenta variações de temperatura maiores comparativamente aos outros apartamentos, especialmente na sala e no quarto principal, sugerindo que exista algum tipo de aquecimento do espaço.

Também pela análise do gráfico da Figura 43, reparamos que existem alguns picos de temperatura que têm a duração de cerca de 3 horas. Em tons de especulação, pressupõe-se que este aquecimento súbito do espaço, maioritariamente da sala e do quarto principal, corresponde a períodos de atividade humana que promovam este fenómeno, como cozinhar.

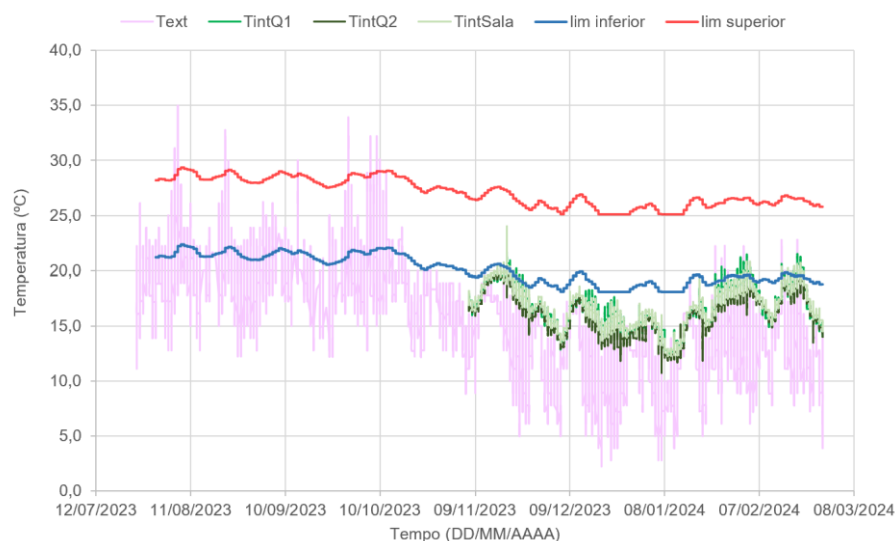


Figura 43 - Variação dos limites de conforto e da temperatura interior e exterior ao longo do tempo (C-2º).

5.1.2.6. Apartamento no 1º piso do edifício D

A Figura 44 representa a variação da temperatura interior de um apartamento no 1º piso do edifício D. Pela análise do gráfico, verificamos que, nos meses mais quentes, nomeadamente de agosto até outubro, a temperatura interior varia dentro dos limites definidos pela norma. No inverno, a temperatura está quase sempre abaixo do limite inferior, tal como acontece em todos os apartamentos apresentados anteriormente.

Podemos observar no gráfico da Figura 44, que no inverno existe maior tendência para a variação de temperatura interior ser maior, o que pode sugerir que os inquilinos efetuem o aquecimento do espaço através de equipamentos de aquecimento mecânico. Observam-se também alguns picos de temperaturas que duram poucas horas, principalmente na sala. Por detrás deste fenómeno podem estar causas relacionadas com atividades humanas, como cozinhar. É importante salientar que este apartamento é o único sem extração mecânica na cozinha.

A temperatura interior máxima registada foi de 29 °C e foi geral em todas as divisões, sendo que a diferença entre as temperaturas interior e exterior máximas foi de 6°C. A temperatura inferior foi registada no quarto com menor área e o seu valor foi de 10 °C, sendo que a diferença com a temperatura mínima exterior corresponde a 8 °C.

É possível identificar um padrão em todos os apartamentos, a temperatura mínima interior ter sido registada no quarto mais pequeno. Isto provavelmente estará relacionado com o facto de que este quarto nos edifícios A, B, C e D apresenta uma orientação a Norte, enquanto que o quarto maior e a sala estão orientados a Sul, pelo que têm mais ganhos solares do que o quarto mais pequeno.

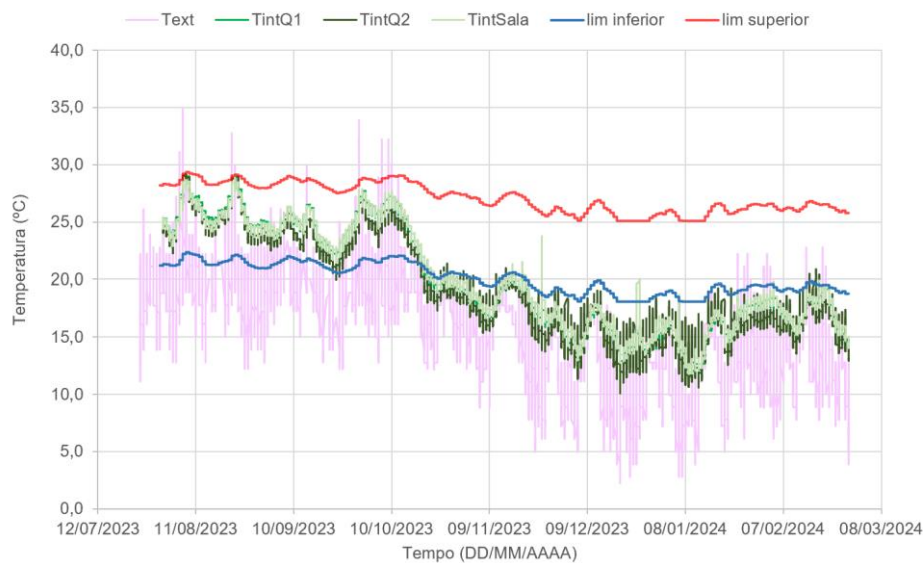


Figura 44 - Variação dos limites de conforto e da temperatura interior e exterior ao longo do tempo (D-1º).

5.1.2.7. Apartamento no 3º piso do edifício E

O gráfico representado na Figura 45 regista a variação da temperatura interior de um apartamento no 3º piso do edifício E. É importante referir que o edifício E é o único que tem uma orientação solar diferente dos outros, como podemos observar na Tabela 6. Apesar disso, verificamos que a variação da temperatura interior se assemelha bastante ao apartamento no 3º piso do edifício A, analisado previamente.

Este apartamento, E-3º, apresenta nos meses mais quentes temperaturas interiores que se mantêm dentro dos limites de conforto, salvo algumas exceções, em que é ultrapassado o limite superior imposto pela norma. Tal como todos os outros apartamentos analisados previamente, no inverno regista sempre valores de temperatura interior mais baixos do que o limite inferior imposto pela norma.

Pela análise dos dados, verificamos que, a temperatura máxima interior registada deu-se no quarto principal e foi de 31 °C, a mínima foi também nesta divisão e o seu valor foi de 8 °C. As diferenças entre as temperaturas máxima e mínima interior e exterior são respetivamente de 4 °C e de 6 °C.

Podemos concluir então que este apartamento está mais sujeito à variação da temperatura exterior do que os outros, visto que, a variação máxima e mínima entre as temperaturas interior e exterior é menor do que em outros apartamentos analisados atrás.

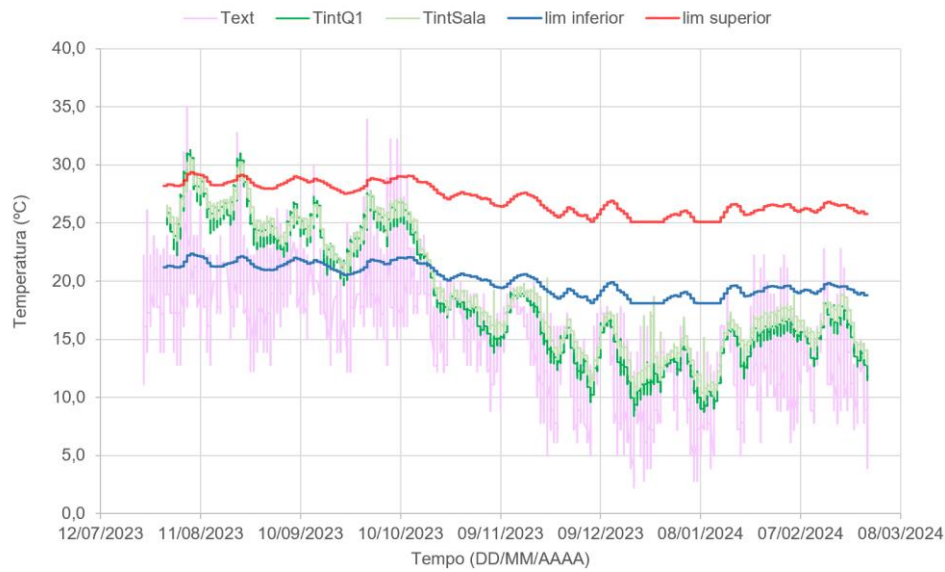


Figura 45 - Variação dos limites de conforto e da temperatura interior e exterior ao longo do tempo (E-3°).

5.2.2. O MODELO DA EN 16798

A EN 16798 fornece diretrizes detalhadas para garantir que os ambientes internos mantenham condições térmicas que são percebidas como confortáveis pela maioria das pessoas, daí ser crucial verificar o cumprimento destas exigências, de forma a garantir um ambiente interior dentro das habitações com maior qualidade.

Este modelo estabelece o conforto térmico segundo a relação entre a temperatura interior (ou temperatura operativa) e a temperatura média exponencialmente ponderada, criando limites inferiores e superiores que definem o intervalo de conforto térmico. Tal como descrito no subcapítulo 2.4.3, à semelhança de [5], foram utilizados dois indicadores para facilitar a interpretação dos resultados. O indicador 1 (I1) (°C) serve para, em momentos de desconforto, medir a gravidade desse desconforto, essa gravidade está quantificada pela diferença entre a temperatura interior e a temperatura limite. Quanto maior for essa diferença, mais grave será considerado o desconforto térmico. O indicador 2 (I2) (%) terá o papel de indicar a quantidade de tempo em que existiu desconforto, em percentagem, ao quantificar e somar os momentos em que existiu desconforto térmico e dividindo pelo período total de testagens.

$$\text{Indicador 1 [severidade (°C)]} = \frac{\sum |TEMP_{UH}|}{n} \quad (7)$$

$$\text{Indicador 2 (percentagem de desconforto (\%))} = \frac{\sum UH}{T} \times 100\% \quad (8)$$

Como já mencionado previamente, a temperatura interior (ou operativa) é influenciada pelas variações da temperatura média exterior exponencialmente ponderada. E são variáveis diretamente proporcionais, ou seja, se uma aumenta a outra irá aumentar também.

Na Figura 46 (a) podemos observar a temperatura operativa obtida por aplicação do modelo adaptativo da EN 16798 no apartamento do rés-do-chão do bloco A. É possível observar que a temperatura operativa manteve-se sempre inferior a 27 °C, e que as temperaturas operativas registadas na sala (representadas no gráfico pela cor verde mais clara) apresentam variações muito maiores do que por exemplo no quarto principal, o que sugere que exista algum tipo de aquecimento nesta divisão. Através na análise dos indicadores I1 e I2, verificamos que as temperaturas mantiveram-se sempre inferiores ao limite máximo estipulado na norma, daí a existência de valores nulos para ambos os indicadores (ver tabela na Figura 46 (a) a vermelho). Passando agora para a análise dos indicadores relativos ao limite inferior estipulado na norma (representados pela tabela azul na Figura 46 (a)) verifica-se o não cumprimento das exigências térmicas durante 63% do tempo de recolha de dados para o quarto principal e durante 55% do tempo para a sala. O valor mais severo quantificado para analisar o desconforto, registou-se no quarto principal e representa uma temperatura que está 3 °C abaixo do valor da norma para aquele dia.

A Figura 46 (b) representa a aplicação do modelo adaptativo da EN 16798 no apartamento do 3º piso do bloco A. É importante salientar mais uma vez que neste apartamento só existem dados relativos à sala até meados de novembro, esta informação deve ser mantida em mente aquando da análise dos indicadores. Este apartamento situa-se logo por baixo da cobertura e por isso apresenta temperaturas operativas que podem alcançar os 33 °C. Tal como o anterior, este é um apartamento cuja análise do gráfico demonstra um bom desempenho nos meses mais quentes e um mau desempenho térmico nos meses mais frios do ano. Através da análise dos indicadores, verificam-se algumas medições que ultrapassam o valor do limite superior imposto pela norma, no entanto são situações pontuais, visto que a percentagem de tempo em que existiu desconforto térmico devido a valores de temperatura que ultrapassam o limite superior rondou os 2/3 %. Passado agora para a análise dos indicadores relativos a temperaturas inferiores ao limite inferior aferido pela EN 16798, verifica-se que existiu desconforto térmico durante 62 % no quarto principal e 65% no quarto secundário, na sala a percentagem é menor visto que não existem dados desde novembro até fevereiro. A diferença mais severa fez-se notar no quarto secundário e correspondeu a um valor de temperatura que se situava 4 °C abaixo do limite inferior da norma.

Através da observação da Figura 46 (c) podemos analisar a aplicação do modelo da EN 16798 ao apartamento do rés-do-chão do edifício B. Em termos de análise demonstra-se bastante semelhante ao apartamento da Figura 46 (a) (ambos estão situados no rés-do-chão e apresentam a mesma orientação solar). As temperaturas operativas mantêm-se inferiores aos 27 °C, e o apartamento demonstra um bom desempenho térmico no verão, enquanto que, demonstra um fraco desempenho no inverno. A observação dos indicadores vem corroborar exatamente isso, visto que apresenta valores dos indicadores para o desconforto, associado a temperaturas operativas superiores ao limite, nulos. Os indicadores que analisam relativamente ao limite inferior, quantificaram que na sala existe desconforto térmico 69 % do tempo de recolha de dados, e no

quarto principal durante 67 % do tempo, sendo que a diferença mais severa de temperaturas foi de 3,7 °C na sala.

Na Figura 46 (d) é possível visualizar a aplicação do modelo da EN 16798 ao apartamento do rés-do-chão do edifício C. Tal como nas Figuras 46 (a) e (c), temos de novo representado um apartamento no rés-do-chão. Estes três apartamentos do rés-do-chão analisados, apesar de estarem em edifícios diferentes, apresentam todos a mesma orientação solar. Por esse motivo, estimamos que a semelhança nos seus comportamentos térmicos esteja associada a esses fatores. Tal como nos outros, a temperatura operativa manteve-se abaixo dos 27 °C e o indicador responsável por quantificar o desconforto associado ao limite superior estipulado pela norma revela valores nulos. Já o indicador que quantifica o desconforto associado a temperaturas operativas inferiores ao limite inferior imposto pela norma, revela que nas três divisões fez-se sentir desconforto térmico durante cerca de 62 % do período de recolha de dados. Mais uma vez a diferença mais acentuada entre a temperatura interior e o limite da norma fez-se notar no quarto secundário, sendo esta diferença de 4,2 °C.

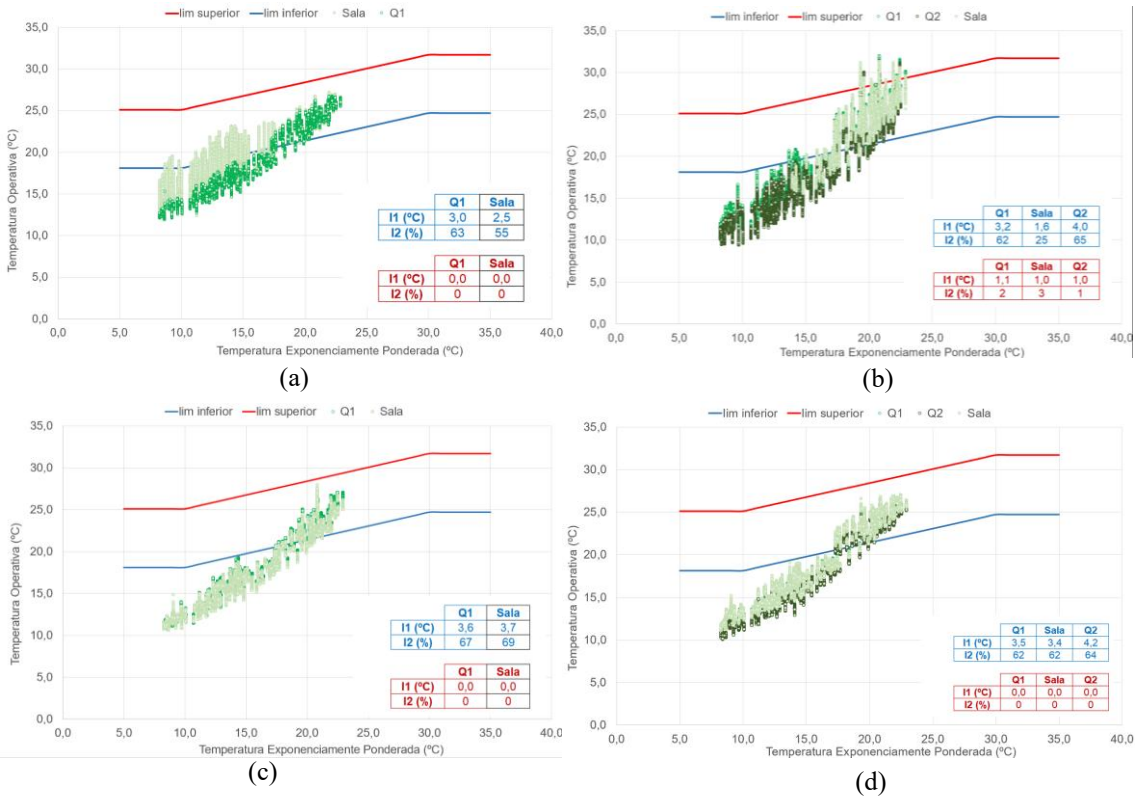
Na Figura 46 (e) está aplicado o modelo adaptativo ao apartamento do 2º piso do edifício C. Tal como no apartamento A-RC, houve perda de dados neste apartamento, apenas estão representados os dados medidos desde novembro até fevereiro. Por essa razão os indicadores não representam valores reais indicados para serem usados como comparação, no entanto nos meses em que há medições verifica-se um comportamento semelhante aos apartamentos analisados anteriormente, pelo que é viável supor que o comportamento térmico será similar aos apartamentos já analisados.

Passando agora para a observação da Figura 46 (f) onde se observa aplicação do modelo adaptativo ao apartamento do 1º piso do edifício D. Através da análise do gráfico, verifica-se que o comportamento térmico é semelhante aos dos apartamentos já analisados. As temperaturas operativas máximas já se revelam um pouco maiores, rondando os 29 °C, no entanto, não é o suficiente para causar desconforto térmico segundo a norma. Podemos verificar que as temperaturas ultrapassam o limite superior, pontualmente, mas as diferenças são tão pequenas (na ordem dos 0,1/0,2 °C) que nem são quantificadas como período de desconforto. No caso do indicador referente a quantificar temperaturas e períodos de temperaturas operativas inferiores ao limite inferior indicado pela norma, verifica-se uma concordância com os apartamentos analisados previamente, sendo que durante cerca de 60 % do período de recolha de dados existiu desconforto térmico associado a temperaturas mais baixas que a do limite. Mais uma vez, a diferença mais severa de temperaturas fez-se notar no quarto secundário representada por um valor de 3,6 °C.

Por fim, a análise da Figura 46 (g) demonstra a aplicação do modelo da EN 16798 ao apartamento do 3º andar do edifício E. Neste caso, já se fazem notar mais similaridades com o apartamento do 3º piso analisado previamente e representado pela Figura 46 (b) do que com os apartamentos do rés-do-chão, visto que a temperatura operativa atinge valores superiores aos 30 °C e apresenta algumas situações pontuais de desconforto associado a temperaturas superiores ao limite máximo

definido pela norma. Relativamente ao desconforto associado a temperaturas mais baixas que o limite inferior estipulado pela norma, a diferença mais acentuada entre o interior e o exterior fez-se notar no quarto principal e correspondeu a um valor de 4,5 °C. Tal como nos outros apartamentos, a percentagem de tempo em que existiu desconforto térmico relativamente ao limite inferior foi na ordem dos 60 %.

Comparando as análises efetuadas ao conforto térmico nos vários apartamentos, podemos concluir que os sete apartamentos testados apresentam comportamentos térmicos bastante similares. Estas similaridades estão relacionadas com o facto de se localizarem todos na mesma zona e de todos terem sido construídos de forma idêntica. O comportamento térmico destes apartamentos é bastante positivo nos meses mais quentes, no entanto, apresenta um mau desempenho face aos meses mais frios do ano, visto que nesta época do ano todos são marcados por desconforto térmico na ordem de 60 % do tempo do período de estudo. As diferenças pontuais que se demonstram entre apartamentos, tais como o facto dos apartamentos no último piso apresentarem temperaturas operativas mais quentes no verão e mais frias no inverno do que os outros apartamentos, bem como, um valor muito baixo (1 % a 3 %) do indicador relativo ao limite da temperatura superior. Supõe-se que a razão para esta situação resida no facto da cobertura não ser isolada termicamente. Outro comportamento padrão que se fez notar desta análise ao conforto térmico, foi que o quarto mais pequeno exhibe a diferença de temperatura medida pelo indicador 1 (I1) mais severa. Nos apartamentos em que se efetuaram registo de temperaturas apenas no quarto principal, este tem tendência para apresentar valores superiores do indicador 1 comparativamente à sala.



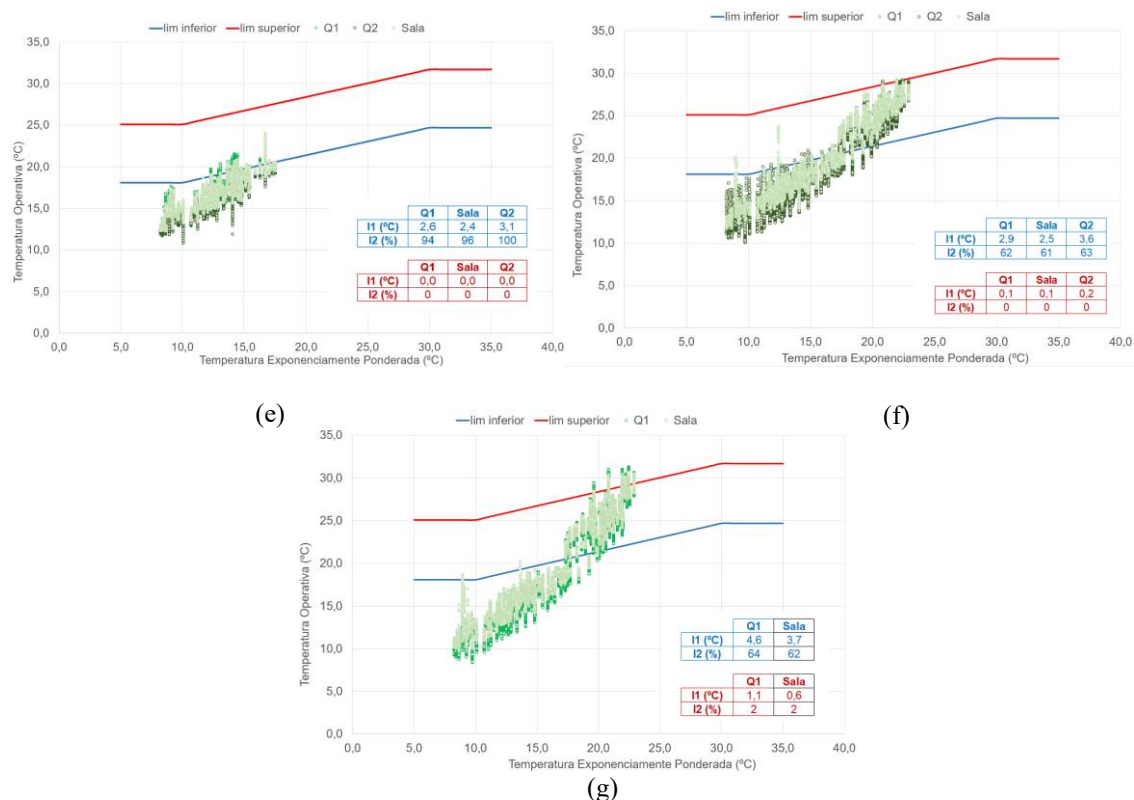


Figura 46 - Aplicação do modelo da EN 16798: Registos no apartamento (a) A-RC; (b) A-3º; (c) B-RC; (d) C-RC; (e) C-2º; (f) D-1º; (g) E-3º.

5.2.3. HUMIDADE RELATIVA INTERIOR

Nos gráficos representados na Figura 47 estão representadas as evoluções da humidade relativa interior e exterior ao longo do tempo por apartamento, bem como os limites a 25 % e 60 % estipulados na EN 16798. Para além disso foi incluído o limite a 80 %, porque para valores de humidade superiores a este limite existem repercussões causadas na saúde humana.

Tal como na avaliação do conforto térmico seguindo a EN 16798, criaram-se dois indicadores para facilitarem a análise e compreensão dos gráficos. O indicador 1 (I1) (%) determina a percentagem de tempo em que a humidade relativa interior ultrapassou o limite de 60 %, o indicador 2 (I2) (%) quantifica a quantidade de tempo que é ultrapassado o limite de 80 %.

Na Figura 47 (a) podemos observar que os valores de humidade são bastante altos durante todo o período de recolha de dados, mantendo-se maioritariamente entre os 60 % e os 80 %. Neste apartamento o valor máximo para a humidade relativa interior foi registado no quarto principal e foi de 95%, o valor mínimo ocorreu na sala e correspondeu a um valor de 42 %. A análise dos indicadores revela que o quarto principal demonstra ser mais húmido que a sala, apresentando valores superiores a 60 % durante 98 % do período de recolha de dados, também ultrapassa o limite de 80 % durante 33 % do tempo. Enquanto que a sala ultrapassa o limite de 60 % durante

90 % do período de recolha de dados, mas apenas ultrapassa o limite de 80 % durante 9 % do tempo.

Relativamente à Figura 47 (b) demonstram-se valores de humidade muito elevados, sendo que o valor máximo registado foi no quarto mais pequeno e foi de 98 %. O valor mínimo foi de 30 % registado na sala. Analisando os indicadores este apartamento aparenta ser menos húmido do que o analisado anteriormente (comparando os indicadores relativos ao quarto principal, na sala faltam dados), de qualquer forma o quarto mais pequeno demonstra ser o mais húmido apresentando um valor para o I1 de 85,6 % e para I2 de 33,9 %.

A análise da Figura 47 (c) revela que, neste apartamento há uma semelhança muito grande entre os valores de humidade recolhidos na sala e no quarto principal. Registou-se o mesmo valor máximo de 98 % em ambas as divisões e o valor mínimo observou-se na sala e foi de 33 %. A análise dos indicadores revela que o quarto principal ultrapassou o limite de 60 % durante 99 % do período de recolha de dados, também ultrapassa o limite de 80 % durante 44,3 % do tempo. Enquanto que a sala ultrapassa o limite de 60 % durante 99 % do período de recolha de dados, mas apenas ultrapassa o limite de 80 % durante 45,5 % do tempo.

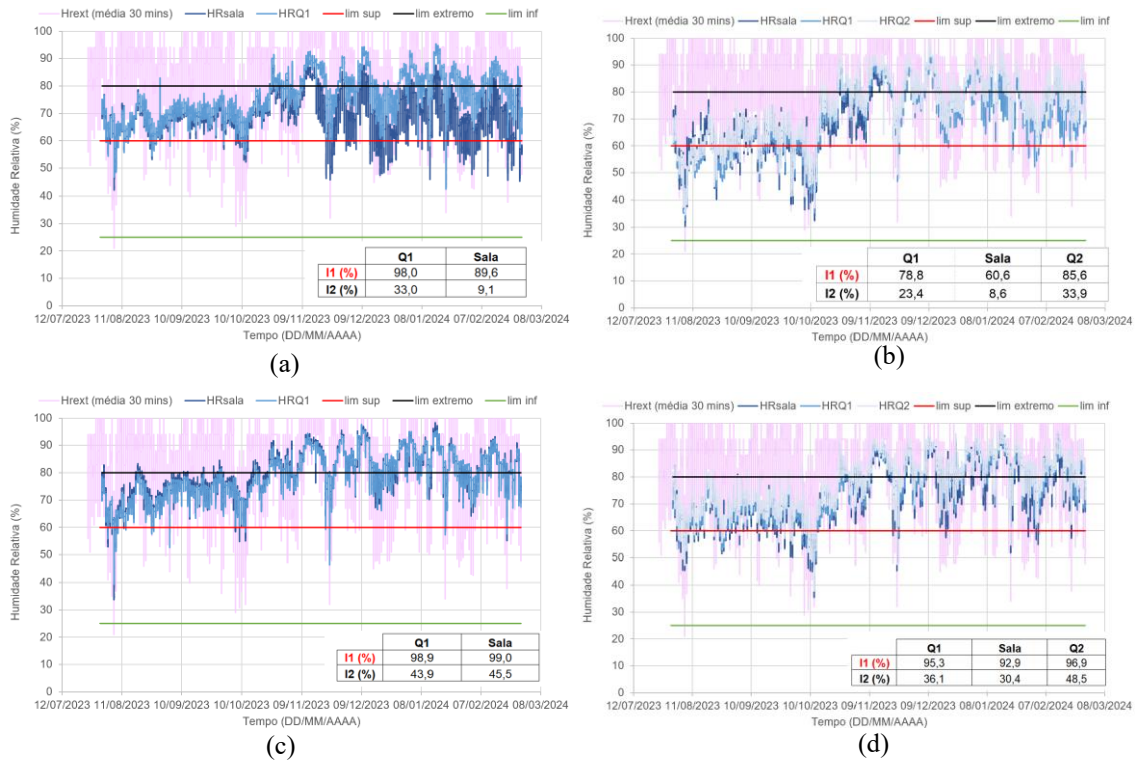
Passando agora para a observação da Figura 47 (d) podemos observar a variação da humidade relativa interior no rés-do-chão do edifício C. O valor máximo foi de 98 % e foi registado no quarto mais pequeno, enquanto que, o valor mínimo ocorreu na sala e foi de 35 %. Analisando os indicadores, verifica-se que todas as divisões ultrapassam o limite de 60 % imposto pela norma durante mais de 90 % do período de recolha de dados. Também apresentam valores para o indicador 2 (I2) superiores a 30 %, é dada especial relevância ao quarto com menor área por ser o mais húmido apresentando um I2 de 48,5 %.

Na Figura 47 (e) apenas estão representados os dados recolhidos a partir de novembro para o apartamento do 2º piso do edifício C. O valor máximo foi registado no quarto principal e foi de 100 % e o valor mínimo foi tanto na sala como no quarto mais pequeno e foi de 45 %. Analisando os indicadores, verificamos que este apartamento é consideravelmente mais húmido que os outros. Apresentando valores para o indicador 1 (I1) de quase 100 % em todas as divisões, e valores de I2 para a sala, quarto 1 e quarto 2 de 82,1 %, 50,9 % e 69,1 %, respetivamente.

Observando o gráfico da figura 47 (f) verifica-se novamente o quarto mais pequeno a apresentar valores de humidade superiores. Apesar disso, o valor máximo medido para a humidade neste apartamento foi na sala e correspondeu a 98 %. O valor mínimo também foi na sala e correspondeu a um valor de 35 %. Analisando os indicadores, verifica-se que todas as divisões ultrapassam o limite de 60 % imposto pela norma durante mais de 90 % do período de recolha de dados. Também apresentam valores para o indicador 2 (I2) superiores a 30 %, é dada especial relevância ao quarto com menor área por ser o mais húmido apresentando um I2 de 55,3 %.

Por fim, analisando o gráfico da figura 47 (g) notam-se mais semelhanças com o gráfico da figura 47 (b) do que com os restantes. Neste apartamento os valores máximos e mínimos medidos ocorreram em ambas as divisões, correspondendo o máximo a uma percentagem de 97 % e o mínimo a uma percentagem de 30 %. A análise dos indicadores revela que o quarto principal demonstra ser mais húmido que a sala, apresentando valores superiores a 60 % durante 80,6 % do período de recolha de dados, também ultrapassa o limite de 80 % durante 35 % do tempo. Enquanto que a sala ultrapassa o limite de 60 % durante 77,2 % do período de recolha de dados, mas apenas ultrapassa o limite de 80 % durante 21,3 % do tempo.

Analisando de uma forma geral os gráficos da Figura 47, podemos concluir que todos os apartamentos estudados apresentam valores de humidades relativas interiores extremamente altos, provocando uma má qualidade do ar interior e muitas vezes tecendo riscos para a saúde humana. É notável que os apartamentos do último piso apresentam valores mais baixos de humidades do que os outros, no entanto são muito altos de qualquer forma. É dada especial relevância ao C-2º (representado pela Figura 47 (e)) por apresentar valores muito elevados do indicador 2 (I2), especialmente no quarto principal. Através da análise dos gráficos podemos verificar que os apartamentos raramente registam valores de humidade situados dentro da faixa de conforto imposta pela norma.



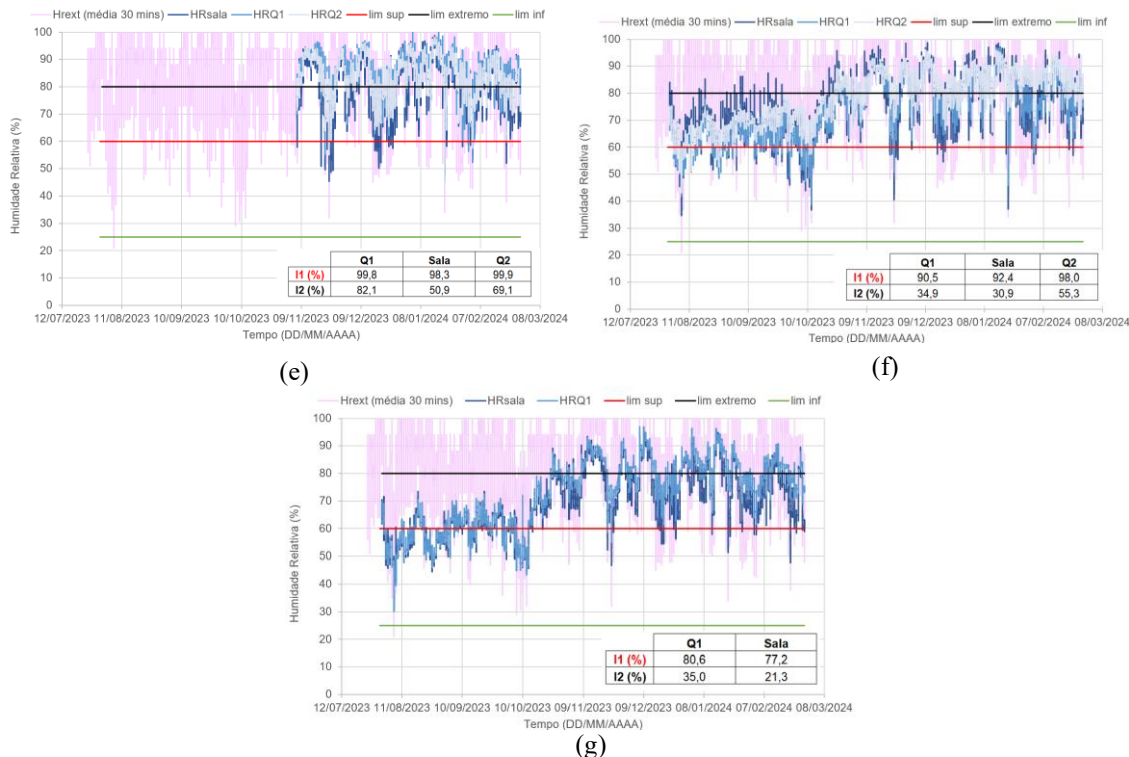


Figura 47 - Variação da HR interior: Registos no apartamento (a) A-RC; (b) A-3º; (c) B-RC; (d) C-RC; (e) C-2º; (f) D-1º; (g) E-3º.

5.3. VENTILAÇÃO

5.3.1. MÉTODO DO GÁS TRAÇADOR

Como já foi referido no subcapítulo 3.4., o método do gás traçador consiste em injetar num espaço um gás e registar o seu decaimento ao longo do tempo. Neste caso, os testes foram efetuados num apartamento que se encontrava vazio, com função de sala de reunião de obras. É importante salientar que neste apartamento, o quarto principal e a sala estão orientados a Este, e o quarto mais pequeno está orientado a Oeste. Durante os dias das testagens o apartamento manteve-se obviamente vazio para não interferir com os resultados dos testes. Foram efetuados testes aos 3 compartimentos principais da habitação, a sala e os dois quartos. A análise dos resultados é feita através de uma folha de cálculo e da aplicação de uma regressão linear (pelo método dos mínimos quadrados), de forma a obter o valor do declive que corresponde à taxa de renovações por hora do ar daquele espaço. A folha de cálculo está apresentada na Figura 48.

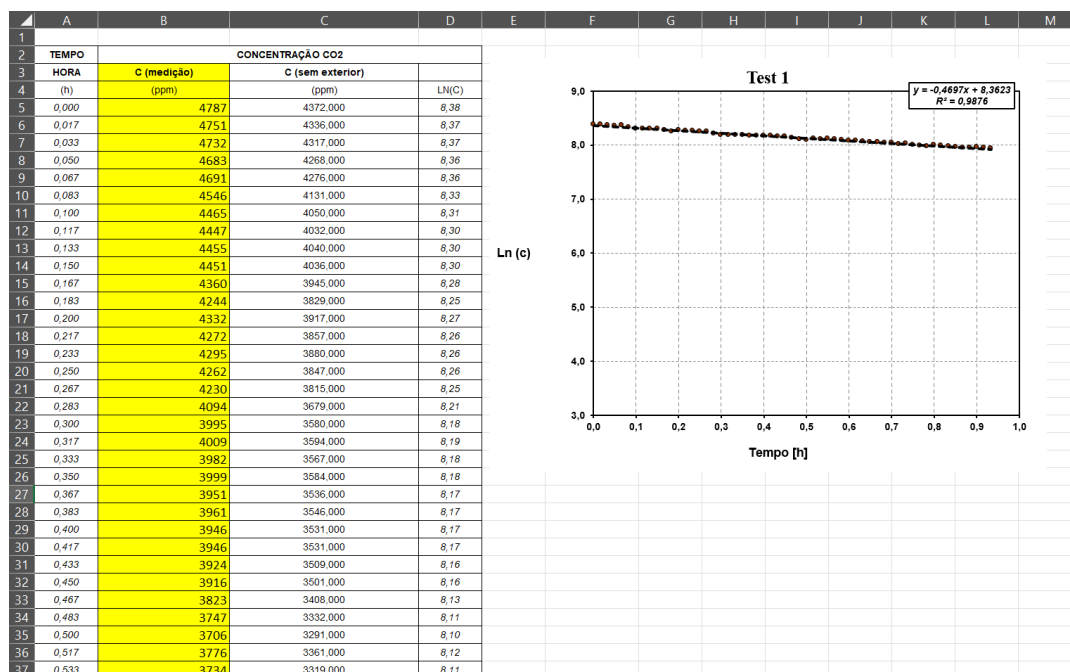


Figura 48 - Folha de cálculo para análise dos resultados obtidos pelo método do dás traçador.

5.3.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Foram efetuadas 3 rondas de testes a cada divisão, usando para o efeito 2 sensores em cada ensaio, colocando um no centro da divisão e outro junto à janela, os resultados são apresentados na Tabela 12. Como podemos observar, nas 3 rondas verificaram-se diferenças significativas nos valores obtidos para as renovações horárias do ar interior do espaço testado.

Tabela 12 - Renovações horárias (Rph-1) obtidos nos testes efetuados pelo método do gás traçador.

	Ronda 1		Ronda 2		Ronda 3	
	Centro	Janela	Centro	Janela	Centro	Janela
Sala	0,87	0,88	3,57	3,93	2,29	2,58
Quarto 1	0,65	0,69	1,00	XX	0,47	0,43
Quarto 2	0,99	1,46	3,13	3,22	1,57	1,47

Em primeiro lugar, verificamos um aumento significativo do valor das R_{ph}^{-1} entre as rondas 1 e 2, apesar das condições de teste terem sido mantidas iguais nas três rondas. Numa tentativa de se justificar estas diferenças, surgiram 2 possíveis causas para esta subida:

1. O facto de este edifício se encontrar em reabilitação. Durante o período de teste das 2^{as} rondas, estava a ser construído o poço do elevador, sendo que o edifício apresentava a fachada principal bastante comprometida, permitindo a entrada de ar em quantidades e por zonas fora do habitual;

2. A relação direta com a intensidade e a direção do vento. Velocidades do vento mais acentuadas, ou mesmo, se o vento incidir diretamente na fachada onde existem vãos envidraçados ou admissões de ar naquele compartimento, é comum obter-se valores de renovações horárias maiores.

Para analisar a relação entre a intensidade e a direção do vento, recorreu-se a uma folha de cálculo onde foram organizados esses dados relativos ao período em que foram efetuados os testes nos compartimentos. Esses dados foram representados num gráfico radar para facilitar a compreensão (Figura 49).

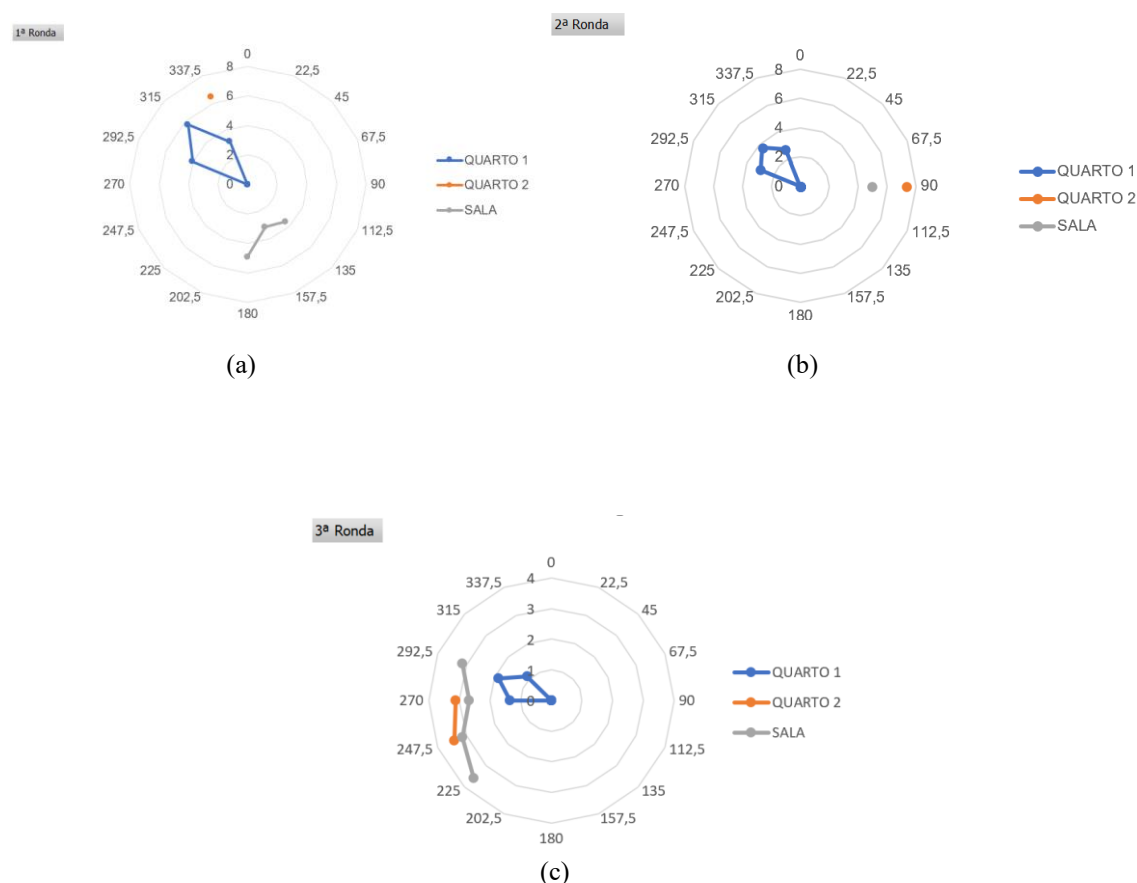


Figura 49 - Gráfico radar com a média das velocidades e direção do vento: (a) Ronda 1; (b) Ronda 2; (c) Ronda 3.

Através da análise dos dados acima representados (Figura 49), é possível tirar algumas conclusões que possam facilitar a compreensão da influência da velocidade do vento e da sua direção nos ensaios levados a cabo. Nas extremidades dos gráficos radar estão representados os pontos cardiais, transpostos em graus, ou seja, 0° corresponde ao Norte, 90° ao Este, 180° ao Sul e 270°

a Oeste. As linhas radiais representam a média das velocidades do vento. O que nos permite observar em que direção foi mais intenso o vento.

Através da observação da Figura 49 (a) e da Tabela 12, podemos verificar que durante as testagens ao quarto 1, o vento era intenso representando uma velocidade média do vento de 6 m/s na direção Noroeste e uma média de 4 m/s para a velocidade do vento nas duas direções adjacentes a Noroeste. No quarto 2 fez-se notar uma velocidade média do vento superior a 6 m/s na direção nor-noroeste. Na sala registaram-se valores médios de velocidade entre os 4 e os 6 m/s nas direções sul, su-sudeste e sudeste. Supõe-se que a velocidade e direção do vento tenha influenciado diretamente os resultados observados no quarto 2, derivando daí a diferença obtida para o valor de Rph^{-1} medido pelo sensor colocado no centro da divisão e junto à janela. O valor obtido pelo sensor junto à janela foi 50 % maior que o valor obtido no centro do quarto.

Passando agora para a observação da Figura 49 (b) juntamente com a Tabela 12, verifica-se um aumento significativo nos valores obtidos para as renovações horárias. Como mencionado anteriormente, a razão pode residir no facto de que a fachada principal do edifício se encontrava bastante comprometida, devido à construção do poço do elevador, permitindo a entrada de enormes quantidades de ar diretamente na caixa de escadas do edifício. Durante o teste ao quarto 1, registaram-se valores médios de velocidade do vento entre os 3 m/s e 4 m/s na direção noroeste e direções adjacentes. Durante a testagem do quarto 2 fez-se sentir uma velocidade média do vento bastante elevada, perto dos 8 m/s, e orientada a Este.

Pela Figura 49 (c) e da Tabela 12, visualiza-se que os valores obtidos para as Rph^{-1} já não são tão elevados quanto foram na 2ª ronda de testes. Durante a testagem do quarto principal, verificamos velocidades médias do vento baixas e orientadas a Oeste. Durante a testagem da sala e do quarto secundário, verificamos que já se fizeram notar velocidades médias superiores e orientadas entre Sul e Oeste.

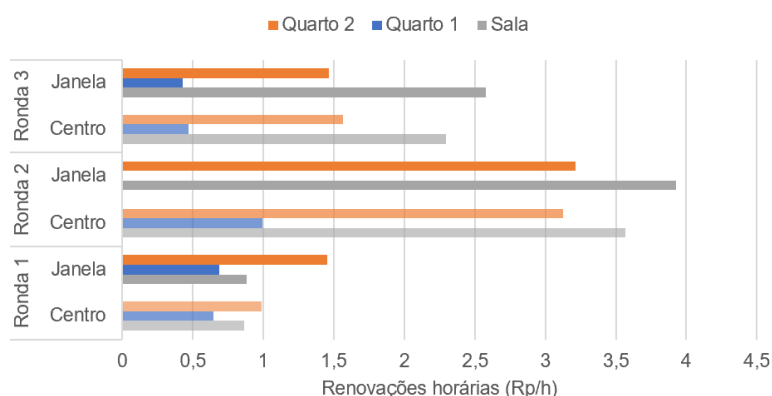


Figura 50 - Renovações horárias nas divisões durante os testes efetuados.

Através da análise da Figura 50, verificamos uma tendência para a sala ser a divisão onde se regista maior renovação do ar interior, exceto na 1ª ronda em que este facto ocorreu no quarto mais pequeno. Tal como já foi referido anteriormente, a partir da 2ª ronda de testes o facto de se

estar a realizar a construção do elevador, especula-se que possa ter promovido as trocas de ar entre o interior e exterior. Para além disso, a sala é a divisão da casa que apresenta mais fronteiras por onde possam existir trocas de ar interior e exterior. Também o fenómeno apresentado previamente pode servir como razão para promover uma maior renovação de ar interior, isto acontece, quando a velocidade do vento exterior é significativa e incide na direção perpendicular à fachada onde se encontra a divisão a ser testada.

Segundo a NP 1037-1, os valores de referência considerados habitualmente são de 1 Rph^{-1} para os compartimentos principais (como é o caso dos compartimentos em estudo) e 4 Rph^{-1} para os compartimentos de serviço (cozinha e instalação sanitária). Na ronda 1 verifica-se que a sala e o quarto secundário se encontram bastante próximos deste valor de referência, no entanto, nas duas rondas de testes seguintes observa-se um aumento deste valor, ultrapassando o valor indicado pela norma. O quarto principal na ronda 2 registou exatamente o valor indicado na norma, no entanto, nas rondas 1 e 3 apresenta valores mais baixos, correspondentes a sensivelmente metade do valor indicado na norma.

6

CONCLUSÕES

6.1. CONCLUSÕES DIRETAS

Este estudo teve como objetivo principal, caracterizar e analisar as condições de conforto térmico em habitações de custos controlados. Através dos dados recolhidos e analisados, foram retiradas as seguintes conclusões:

- A aplicação do modelo adaptativo permitiu concluir que as habitações de custos controlados estudadas nesta dissertação, apresentam condições térmicas que se situam dentro das faixas de conforto no verão. No entanto, não cumprem os limites impostos pela norma durante o período de inverno, revelando sempre valores inferiores ao intervalo de conforto;
- Através da análise estatística foi possível identificar diversos comportamentos padrão comuns às várias habitações. Também permitiu identificar algumas diferenças pontuais que se fazem notar entre elas;
- Através da comparação dos dados recolhidos de temperatura e humidade no interior das habitações, foi concluído que apartamentos que revelam temperaturas mais altas tendem a ser menos húmidos do que os que apresentam temperaturas mais baixas;
- A aplicação do modelo adaptativo da norma utilizada nesta dissertação, permitiu identificar diferenças entre os apartamentos e relacioná-las com características como a orientação das divisões e o piso em que se localizam os apartamentos;
- Os testes efetuados com o método do gás traçador permitiram quantificar as renovações do ar interior das divisões testadas e relacioná-las com os valores impostos pela NP1037-1:2002.

6.2. PROPOSTAS PARA O FUTURO

Atendendo à ampla evolução dos estudos efetuados na área do conforto térmico, existem algumas propostas que podem ajudar a desenvolver e aprofundar este estudo. Estas propostas passam por:

- Introduzir uma fase em que são questionados os moradores, numa tentativa de avaliar a sua perceção relativamente ao ambiente térmico em que se inserem e relacionar as suas respostas com a análise efetuada segundo o modelo adaptativo da norma;
- A campanha prolongou-se durante o período de quase um ano, pelo que é importante sensibilizar os moradores para o funcionamento e cuidados a ter com os sensores;
- Expandir a localização geográfica das habitações em análise. Introduzir novas regiões climáticas permite uma análise aprofundada do comportamento térmico de edifícios de custos controlados face às condições exteriores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Parsons, K. *Human thermal environments. The Effects of Hot, Moderate, and Cold Environments on Human Health, Comfort, and Performance*. 3rd edition. CRC Press. 2014 [9780429169656_previewpdf.pdf](#)
- [2] Charles, K. *Fanger's Thermal Comfort and Draught Models*. Institute for Research in Construction. National Research Council of Canada, Ottawa. 2010. <https://nascoinc.com/content/resources/PO-Fanger-Thermal-Comfort.pdf>
- [3] *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*, ASHRAE 55, 2013. <https://ierga.com/hr/wp-content/uploads/sites/2/2017/10/ASHRAE-55-2013.pdf>
- [4] Almeida, Hélder. *THERMAL COMFORT ANALYSIS OF BUILDINGS USING THEORETICAL AND ADAPTIVE MODELS*. Instituto Superior Técnico de Lisboa. 2010. [resumo.pdf](#)
- [5] Guimarães J. *CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DAS CONDIÇÕES DE CONFORTO TÉRMICO EM JARDINS DE INFÂNCIA – CASOS DE ESTUDO NO MARCO DE CANAVESSES*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. [Dissertação Joana Guimarães \(versão final\).pdf](#)
- [6] Jiao Y., Yu H., Yu Y., Wang Z., Wei Q. *Adaptive thermal comfort models for homes for older people in Shanghai, China*. Elsevier. 2020 [1-s2.0-S0378778819315294-main.pdf](#)
- [7] Kwong Q., Adam N., Sahari B. *Thermal comfort assessment and potential for energy efficiency enhancement in modern tropical buildings: A review*. Elsevier. 2011. [1-s2.0-S0378778813006166-main.pdf](#)
- [8] Aqilah N., Rijal H., Zaki S. *A Review of Thermal Comfort in Residential Buildings: Comfort Threads and Energy Saving Potential*. Elsevier. 2022. [energies-15-09012.pdf](#)
- [9] Amaro D. *CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DAS CONDIÇÕES DE CONFORTO TÉRMICO E VENTILAÇÃO DE UM APARTAMENTO EM AMARANTE*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 2021 [485036.pdf](#)
- [10] Zhao Q., Lian Z., Jai D. *Thermal comfort models and their developments: A review*. ScienceDirect. 2021. [1-s2.0-S2666123320300593-main.pdf](#)
- [11] Karl M. *AValiação da Qualidade do Ambiente Interior num Edifício Antigo do Porto*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 2021 [Dissertacao_Matheus_Karl_VF.pdf](#)

- [12] Teixeira A. *Impacto da Norma de Conforto Europeia EN 15251 na certificação energética em edifícios de serviços*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 2009 [000137740.pdf](#)
- [13] Han J., Zhang G., Zhang Q., Zhang J., Liu J., Tian L., Zheng C., Hao J., Lin J., Liu Y., Moschandreas D. *Field study on occupants' thermal comfort and residential thermal environment in a hot-humid climate of China*. ScienceDirect. 2006. [1-s2.0-S0360132306003763-main.pdf](#)
- [14] CEN. EN 16798-2. *Guideline for using indoor environmental input parameters for the design and assessment of energy performance of buildings*. 2014 [EN_16798-2-draft-Substitui15251.pdf](#)
- [15] Amaral M. *SISTEMAS DE VENTILAÇÃO NATURAL E MISTOS EM EDIFÍCIOS DE HABITAÇÃO*. Dissertação de Doutoramento. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 2008 [Texto integral.pdf](#)
- [16] Instituto Português da Qualidade. NP 1037-1. *Ventilação e evacuação dos produtos da combustão dos locais com aparelhos a gás. Parte 1: Edifícios de habitação. Ventilação natural*. 2022 [NP_1037-1_Ventilacao_produtos_combustao_aparelhos_gas-Ventilacao_natural.pdf](#)
- [17] Teixeira J. *A IMPORTÂNCIA DA VENTILAÇÃO NA MANUTENÇÃO DE NÍVEIS ACEITÁVEIS DE POLUENTES EM EDIFÍCIOS DE HABITAÇÃO*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 2019 [Dissertacao_Joana_Teixeira.pdf](#)
- [18] Santos M. *Ventilação natural e comportamento térmico de edifícios*. Dissertação de Mestrado. Instituto técnico de Lisboa. 2017 [Tese completa - versao final.pdf](#)
- [19] Diário da República nº 235/2013, Série I. *REGULAMENTO DE DESEMPENHO ENERGÉTICO DOS EDIFÍCIOS DE COMÉRCIO E SERVIÇOS (RECS) REQUISITOS DE VENTILAÇÃO E QUALIDADE DO AR INTERIOR*. 04/12/2013 [0000200009.pdf](#)
- [20] Pinto M., Freitas V., Viegas J., *QUALIDADE DO AMBIENTE INTERIOR EM EDIFÍCIOS DE HABITAÇÃO*. Setembro 2007. [70643057.pdf](#)
- [21] Google Maps. Acedido as 23/05/2024. <https://www.google.pt/maps/@41.2364491,-8.6264055,17z?hl=pt-PT&entry=ttu>
- [22] ASTM International. *E741-00 Standard Test Method for Determining Air Change in a Single Zone by Means of a Tracer Gas Dilution*. [ASTM_E741 - 2000.pdf](#)
- [23] IPMA. Normas climatológicas. https://www.suapesquisa.com/geografia/classificacao_climatica.htm
- [24] HOBO data loggers. *HOBO® MX CO2 Logger (MX1102A) Manual*. <https://www.onsetcomp.com/sites/default/files/2022-11/22504-G%20MX1102A%20Manual.pdf>

[25] SENSIRION. *SHT4x Smart Gadget User Guide*.
[Sensirion_Humidity_Sensors_SHT4x_Smart-Gadget_User-Guide.pdf](#)