



UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Felipe Dias Baptista Gomes Caldas

COMPORTAMENTO HIGROTÉRMICO DE PEQUENOS
ESPAÇOS MUSEOLÓGICOS DE BAIXA OCUPAÇÃO
ESTUDO DE CASO

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil na área de
Especialização em Construções, orientada pelo Professor Doutor José António
Raimundo Mendes da Silva e pelo Professor Doutor Ricardo Manuel dos Santos
Ferreira de Almeida e apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Julho de 2021

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
Departamento de Engenharia Civil

Felipe Dias Baptista Gomes Caldas

**COMPORTAMENTO HIGROTÉRMICO DE PEQUENOS
ESPAÇOS MUSEOLÓGICOS DE
BAIXA OCUPAÇÃO
ESTUDO DE CASO**

**HYGROTHERMAL BEHAVIOUR OF LOW OCCUPANCY
SMALL MUSEOLOGICAL SPACES
A CASE STUDY**

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Construções,
orientada pelo Professor Doutor José António Raimundo Mendes da Silva e pelo Professor Doutor Ricardo Manuel dos Santos Ferreira de Almeida.

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC
declina qualquer responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões que possa conter.

Julho de 2021



UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor José António Raimundo Mendes da Silva, fonte de inspiração como orador e pessoa, agradeço as entusiasmantes aulas lecionadas na Universidade de Coimbra, e o acesso ao tema desta dissertação que alia a Ciência à História.

Ao Professor Doutor Ricardo Manuel dos Santos Ferreira de Almeida, agradeço a atenção disponibilizada nesta dissertação e a todas sugestões feitas.

Ao Professor Doutor Pedro Júlio Enrech Casaleiro, agradeço aos ensinamentos de Museologia e de História transmitidos.

Ao enciclopédico Professor Doutor Anísio Alberto Martinho de Andrade, agradeço às orientações, lições e recomendações dadas ao longo desse curso. Uma referência para toda minha vida da fusão da: clarividência, cultura geral, rigor e do método.

Agradeço à minha mãe, Flávia Dias Baptista, por ter me acompanhado em cada momento, por estar sempre presente, por ouvir, interagir e agir sempre que necessário. Agradeço todo o amor transmitido, todos os ensinamentos, sem os quais este dia nunca chegaria.

Agradeço ao meu pai, Roberto Gomes Caldas, por ter tornado essa trajetória ainda mais desafiante. Nessa jornada, sempre me estimulou a ser resiliente, devido suas crenças bastantes peculiares sobre o conhecimento.

Aos meus avôs: Janice Quarantei Dias Baptista, Milton Dias Baptista, Lygia Maria Venosa Gomes Caldas e Roberto Gomes Caldas Filho, que tanto me ensinaram sobre o valor da tradição, História e conservação.

Ao meu tio Milton Dias Baptista, agradeço por sempre me estimular e por todos conhecimentos transmitidos.

À lendária avó do coração, Dona Irene.

Aos amigos que fizeram parte desta trajetória. Em especial ao David, Daniela, Elias, Gabriela, Inês, Mafalda, Maiara, Raquel, Rita, Sara, Victor e Viviane, sem os quais muitas saudosas histórias deixariam de existir em nossas memórias.

Ao Wappers, fonte de inspiração para a proteção e conservação museológica.

EPÍGRAFE

Two Up-to-Date Poems

A Liberdade



Quando a noite cair sobre mim,
Não será a terra minha mortalha,
Serei eu também a terra, e
Nem haverá projeções de cruzeiros sobre mim.

Estarei além do prolongamento das montanhas
E, liberta da sombra, brincarei: de ser sol,
De ser flor, criança ou borboleta.

Terei a fluidez das águas e
Estarei além das equações,
Dos paradoxos já sepultos no vale;
E, no vale, só haverá projeção
De cirandas de estrelas.

Janice Quarantei Dias Baptista

(25/05/1969)

Figura E-1 – Céu estrelado (montagem) visto no Pavilhão do Círculo Meridiano do Observatório Geofísico e Astronómico da Universidade de Coimbra. Fotografia de Felipe D.B.G. Caldas e edição de Victor Maciel Peixoto de Souza.

RESUMO

O microclima num museu é dependente da harmonia entre condições de temperatura e humidade. Diferentes configurações de aquecimento, arrefecimento ou ventilação induzem o edifício a um comportamento higrotérmico. Estas podem propiciar condições de insalubridade que podem comprometer tanto o edifício quanto o seu acervo.

Os pequenos museus são mais suscetíveis às perturbações do microclima em comparação com os grandes museus. A mudança repentina das condições ambientais, como o aumento brusco das condições de humidade relativa, influencia mais as construções de menor volume interior. Isto é particularmente relevante em pequenos edifícios de museus, por serem mais sensíveis às variações higrotérmicas.

Como caso de estudo, escolheu-se o Pavilhão do Círculo Meridiano do Observatório Geofísico e Astronómico da Universidade de Coimbra. Construído ao início da década de 1950, o Pavilhão possui paredes espessas em alvenaria de pedra, as quais conferem elevada inércia térmica ao edifício. O estudo proposto testa o comportamento microclimático do edifício ao longo de quatro meses e em configurações distintas de gestão do microclima – por meio de contributos exteriores impostos.

Nesta dissertação, analisam-se e discutem-se os resultados das medições de temperatura e humidade ao longo dos meses de fevereiro, março, abril e maio. Além disso, realiza-se um estudo estatístico baseado em dia-tipo para representar o comportamento higrotérmico. O dia-tipo representa num único dia do mês 24 diagramas de caixa (um diagrama de caixa a cada hora inteira do dia), os quais fornecem informação sobre todos os valores mensais dos parâmetros climáticos. Os dados, coletados por meio de sensores *data loggers*, posteriormente ao tratamento, foram utilizados como fonte de dados para os gráficos de dia-tipo.

Por meio de campanhas de registo higrotérmico no interior do edifício, foram testados os casos de: aquecimento, ventilação e desumidificação. Dessa forma, averiguam-se as modificações que essas inserções geraram ao ambiente interno, e, assim, discutem-se algumas particularidades desse caso de estudo.

Palavras-chave: Análise higrotérmica; museus; conservação preventiva; Pavilhão do Círculo Meridiano do Observatório Geofísico e Astronómico da Universidade de Coimbra.

ABSTRACT

The microclimate in a museum is dependent on the harmony between the conditions of temperature and humidity. Different settings for heating, cooling or ventilation induce various microatmospheric behaviour and this can provide healthy or inadequate conditions that can compromise both the building and its collection.

Small museums are more easily induced to microclimate disturbances compared to large museums. Sudden change in environmental conditions, such as the sudden increase in relative humidity conditions, have a greater influence on buildings with a smaller interior volume. This is particularly relevant in small museum buildings, as they are more relevant to hygrothermal variations.

As a case study, the Museum of the Geophysical and Astronomical Observatory of the University of Coimbra was chosen. Built at the beginning of the 1950s, the building consists of stone walls with high thermal inertia and has an old and deactivated retractable iron dome. The proposed study tests the building's behaviour in different configurations - through external contributions.

The results of the temperature and humidity specifications over the months of February, March, April and May are analyzed and discussed. The data collected through data loggers sensors made it possible to obtain a wide range of data, which after treatment were used as a data source for the type-days. A statistical study based on standard days is carried out to represent the hygrothermal behaviour.

Through a hygrothermal registration campaign inside the building, the following cases were tested: heating, ventilation and dehumidification. In this way, it is possible to find out how changes these insertions generated in the internal environment and with this discuss some particularities of this case study.

Keywords : Hygrothermic analysis; museums; preventive conservation; Pavilhão do Círculo Meridiano do Observatório Geofísico e Astronómico da Universidade de Coimbra.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento do tema e objetivos	1
1.2 Estrutura da dissertação.....	2
2. CONTROLO HIGROTÉRMICO EM MUSEUS.....	3
2.1 Enquadramento geral.....	3
2.2 Breve evolução histórica da preservação museológica	5
2.3 Fatores decisivos de influência nas condições higrotérmicas em museus.....	7
2.3.1 Coleção.....	8
2.3.2 Edifício	11
2.3.3 Visitas.....	12
2.3.4 Clima exterior.....	13
2.4 Medições higrotérmicas	14
2.5 Diagrama psicrométrico	15
2.6 Alternativas passivas para controlo higrotérmico	17
2.7 Desafios da escolha da faixa higrotérmica adequada	18
2.7.1 Madeira.....	20
2.7.2 Metal.....	21
2.8 Noções gerais de conforto higrotérmico na perspectiva do ambiente interno.....	21
2.9 Normativas sobre conservação museológica.....	22
3. INTRODUÇÃO AO ESTUDO DE CASO	24
3.1 Enquadramento geral e organização do capítulo.....	24
3.2 Contextualização histórica do edifício e do acervo.....	24
3.4 Acervo, mobiliário e patologias	26

3.5	Localização e clima.....	28
3.6	Caracterização do edifício.....	28
3.7	Ensaio experimentais.....	30
3.7.1	Monitorização de temperatura e humidade relativa.....	31
3.7.2	Situações condicionadas.....	33
3.7.3	Tratamento de dados.....	35
4.	RESULTADOS E ANÁLISE HIGROTÉRMICA.....	38
4.1	Enquadramento geral.....	38
4.2	Dados mensais.....	38
4.3	Situações condicionadas.....	52
4.3.1	Aquecimento.....	56
4.3.2	Ventilação.....	57
4.3.3	Desumidificador.....	57
4.4	Avaliação da adequabilidade ao acervo.....	58
5.	CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	63
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	66
	ANEXO A – FOTOGRAFIAS.....	69
	ANEXO B – CÓDIGO DA MACRO.....	70

ABREVIATURAS

T – Temperatura

H – Humidade

HR – Humidade relativa

HA – Humidade absoluta

INT – Interno

EXT – Externo

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento do tema e objetivos

A vertente higrotérmica, numa construção, induz o comportamento do edifício, influencia as condições de habitabilidade, de salubridade e perfaz um ponto fundamental do ambiente interior. O conforto ambiental interior é imediatamente percebido pelo ser humano por meio de fatores físicos tais como: qualidade do ar, temperatura, nível de iluminação natural, nível de ruído e humidade relativa (Amado *et al.*, 2015). A luz, a temperatura e humidade relativa, os poluentes e as pragas são fatores que mais contribuem para a deterioração dos objetos (Alarcão, 2007). Nesta dissertação, focam-se, essencialmente, a conservação e prevenção a depender da temperatura e da humidade relativa. Os demais fatores podem ser alvos de trabalhos futuros.

No contexto de obras de reabilitação de museus, é relevante um estudo global do edifício que integra a análise higrotérmica às soluções de reabilitação. Isso porque permite conciliar os interesses de conservação do edifício e propicia um ambiente com estabilidade higrotérmica para as peças do museu. Nesta dissertação, foca-se o estudo da análise higrotérmica de pequenos espaços museológicos de baixa ocupação.

Apresentam-se, neste trabalho, noções gerais de conservação museológica, com o intuito de fornecer as informações necessárias para uma visão multifatorial do tema e seus vários intervenientes. Salienta-se a importância da conservação preventiva dos espaços museológicos, a qual é capaz de minimizar uma série de danos desnecessários ao acervo. Danos estes que são prejudiciais às peças em si e, portanto, ameaçam o património ou obrigam a largos gastos de restauração. A conservação preventiva nos seus diversos aspectos constitui, atualmente, um objetivo primordial das instituições museológicas (adaptado de Alarcão, 2007).

Se, em construções convencionais para habitação, a análise higrotérmica já é relevante, conforme motivos supracitados, deduz-se, facilmente, o quão importante é o tema quando se trata de museus com acervos inestimáveis. Para assegurar a preservação do acervo museológico, se torna imprescindível a garantia do controle das condições de temperatura e humidade, além de verificação da sua adequabilidade. Como caso de estudo, escolhe-se o Pavilhão do Círculo Meridiano do Observatório Geofísico e Astronómico da Universidade de Coimbra, cujas características são abordadas com maior pormenor ao longo desta dissertação.

Os dados higrotérmicos apresentados são obtidos por meio de sensores *data loggers* dispostos em pontos estratégicos do edifício para uma adequada monitorização. Em seguida tratam-se os dados de forma que se compreendam: a intensidade e frequência das variações de humidade e se o acervo está ou não em ambiente adequado para a sua devida conservação e exposição.

Objetivos do caso de estudo:

- Compreender a relação entre ambiente interno e externo em termos das oscilações higrotérmicas no período de estudo;
- Avaliar a influência da inércia térmica no interior do museu para a preservação museológica;
- Ponderar alguma eventual mudança no microclima caso seja necessária;
- Avaliar e discutir a adequabilidade dos valores obtidos face aos valores de referência, definidos pela bibliografia;
- Identificar aspetos positivos e negativos do comportamento higrotérmico do Pavilhão com a finalidade da preservação museológica.

1.2 Estrutura da dissertação

Este estudo está dividido em 5 capítulos. No primeiro capítulo, apresenta-se a introdução, utilizada como meio de lançar os objetivos, fornecer ao leitor informações básicas e estabelecer aspetos gerais abordados neste trabalho.

No Capítulo 2 elabora-se um panorama geral da temática, esboçando pesquisas realizadas na área por alguns dos principais autores citados na bibliografia. Por meio da fundamentação, interligam-se os conceitos relevantes utilizados e, por outro lado, assegura-se ao leitor um conjunto de dados suficientes para uma sólida contextualização do tema.

No terceiro capítulo introduz-se o estudo de caso do Pavilhão do Círculo Meridiano, seu acervo histórico e suas plantas arquitetônicas. São discutidas como as medições foram obtidas pelos sensores e explica-se como os dados são tratados e divulgados.

No quarto capítulo exibem-se os resultados experimentais, assim como as conclusões obtidas são discutidas e justificadas neste capítulo por meio de gráficos e quadros.

No Capítulo 5 retomam-se os principais pontos e discutem-se os objetivos previamente estipulados, bem como as considerações finais desta investigação. Por fim, são sugeridas propostas para trabalhos futuros, os quais podem dar continuidade ao estudo iniciado nesta dissertação.

2. CONTROLO HIGROTÉRMICO EM MUSEUS

2.1 Enquadramento geral

Em termos gerais, é relevante salientar a importância do controle higrotérmico em museus e as finalidades desse estudo. Um objeto exposto de uma coleção deve, sempre que possível, preservar ao máximo as suas características, isto é, mantê-las em condições tais que o objeto modifique o mínimo possível seu estado com o decorrer do tempo (Knapp, 1993).

Os objetos expostos devem manter a sua identidade para que os museus cumpram as suas funções. Os programas de conservação destes abrangem uma série de medidas a serem tomadas pelos dirigentes de modo a manter o acervo nas melhores condições possíveis. Pode-se, com base na análise higrotérmica do local, prever se o espaço museológico está ou não em condições adequadas, tanto para a conservação das peças quanto para receber determinadas quantidades de público.

Num plano de conservação preventiva, realiza-se a monitorização e coleta de dados de: exposição luminosa, humidade relativa, temperatura, poluição do ar e partículas suspensas (Quadro 2.1). Uma vez que estes fatores podem modificar o estado de conservação da coleção, devem ser analisados num estudo pormenorizado. Posteriormente, realiza-se a inspeção e coleta de informações referentes ao estado de conservação dos objetos da coleção. Sendo preferível a conservação preventiva, pois esta minimiza os impactos dos agentes de deterioração até níveis aceitáveis.

Quando a conservação preventiva é realizada com êxito, reduz-se a necessidade dos tratamentos para a conservação (aqueles que envolvem intervenção na peça). Estes possuem duas grandes categorias: estabilização e restauração (Knapp, 1993). A estabilização tem o objetivo de reduzir a taxa de degradação até níveis aceitáveis; enquanto a restauração tem a finalidade de tornar o objeto o mais parecido possível ao original, sem, porém, modificá-lo excessivamente a ponto de o objeto perder a sua identidade.

O controlo higrotérmico é fundamental para atestar a adequabilidade do espaço museológico enquanto organismo que guarda e exhibe o acervo. Para isso, verificar como a utilização humana do espaço pode alterar as condições ambientais interiores, como a ventilação, o aquecimento e as formas de uso do espaço se tornam fundamentais para a análise. A monitorização contínua dos espaços museológicos ao longo das estações do ano permite a criação de uma base de dados relevante para o controlo higrotérmico nas diversas combinações de temperatura e humidade ao longo dos anos.

Quadro 2.1 – Efeitos da deterioração na coleção (Filippi, 2010)

Humidade Relativa	<ul style="list-style-type: none"> • Mudança de forma e dimensão • Efeito químico (corrosão dos metais e descoloração) • Deterioração biológica
Temperatura	<ul style="list-style-type: none"> • Variações dimensionais • Efeitos químicos-físicos (aceleração das reações químicas e físicas)
Iluminação	<ul style="list-style-type: none"> • Efeitos químicos (oxidação, alteração dos pigmentos, descoloração) • Aumento da temperatura superficial do objeto
Poluição e partículas suspensas	<ul style="list-style-type: none"> • Efeitos químicos (corrosão, oxidação, sulfatação, carbonatação) • Perda de material superficial • Desenvolvimento de microorganismos • Modificação do aspecto estético de objetos

De acordo com o clima temos condições diferentes de temperatura e humidade relativa. O conceito de clima indica uma determinada variabilidade atmosférica que caracteriza determinado território e este, geralmente, é extenso cobrindo regiões inteiras e até mesmo continentes. Determina-se um clima com base nos limites verificados ao longo do tempo para determinadas medições. Com base na estabilidade desses limites que se pode definir um clima em específico (adaptado de Camuffo, 2009).

Quando a escala do clima se reduz à escala do edifício, de um salão, ou até mesmo de uma vitrine expositora, adiciona-se o prefixo micro. A partir disso, pode-se dizer que o espaço museológico possui um determinado microclima, baseado em diversos parâmetros dos quais, nesta pesquisa, destacam-se os valores temporais de T, HR e HA.

Uma vitrine expositora possibilita um microclima à parte do microclima interno do museu. Sendo assim, é de todo o interesse discernir essas zonas com estudos específicos de cada uma delas, uma vez que as condições ambientais são diferenciadas e influenciam as peças da vitrine.

Com a finalidade de aprofundar a análise sobre o comportamento do edifício, serão abordados, neste capítulo, conceitos básicos de propriedades físicas, as quais interagem, de modo específico, no interior de um edifício. O ambiente externo tem influência direta no microclima, podendo-se estabelecer referências entre eles. O microclima é uma síntese de condições ambientais físicas, quer devido a variáveis atmosféricas (T, HR, vento e sol) quer devido às trocas com outros corpos (emissão de infravermelhos, aquecimento, ventilação e iluminação) durante um período de tempo representativo (Henriques, 2015).

Dessa forma, o microclima de um espaço possui características próprias que são induzidas pelo clima exterior. Ambos estão sujeitos a ciclos diários de T e HR, a distinção entre os dois reside no facto de o microclima poder ser controlado (Henriques, 2015). É necessário diferenciar o microclima natural do microclima mecanizado.

O controle microclimático do ambiente destinado à exposição e conservação de artefatos museológicos interessa tanto do ponto de vista do macroambiente (salas de exposições) quanto do microambiente (vitrines)(adaptado de Filippi, 2010). Dessa forma esse controle está intimamente ligado às hipóteses de um determinado bem museológico sobreviver ao longo do tempo.

Geralmente, um ambiente quente e húmido tende a ser mais desfavorável para a conservação do que um ambiente frio e seco. Para modificar definitivamente um microclima pouco adequado para a conservação, deve ser elaborado um plano estratégico para a tomada de decisão, a qual avalia a maneira de realizar a transição do microclima do estado atual para o estado desejado.

No caso de um museu ter excesso de humidade, a opção de desumidificar o ar poderá ser levada em conta. Assim, o estudo do comportamento higrotérmico pode dar uma noção de quais medidas (sejam passivas ou ativas) devem ser tomadas para adequar ou readequar o microclima. Em suma, o controlo higrotérmico serve para quantificar a troca de vapor e calor entre o ambiente e os artefatos museológicos.

2.2 Breve evolução histórica da preservação museológica

Os principais eventos históricos percorridos pela pesquisa apresentada nesta dissertação, e analisados de uma forma cronológica, revelam claramente, que o assunto da preservação museológica já advém de muitos séculos. O principal triunfo da arte da conservação é ter permitido que tantas relíquias e obras de arte superassem séculos e séculos em bom estado e terem chegado aos tempos hodiernos. Esse legado somente pode ser transmitido se o edifício proteger aquilo que guarda.

Vitrúvio, arquiteto romano do século I a.C., abordou a importância da questão da salubridade para a preservação dos espaços interiores. Em sua obra-prima *De architectura*, ele afirma que: “o arquiteto também deve ter um conhecimento do estudo da medicina por conta das questões do clima, do ar, da salubridade, da insalubridade dos locais e sobre os diferentes usos da água. Pois sem estas considerações, a salubridade não pode ser assegurada” (adaptado de Vitruvius, 1931).

Naquela época, a garantia da salubridade interior era advinda do edifício em si, não havendo

intermediação de qualquer sistema mecânico conforme observado atualmente. A água era um fator de grandes preocupações para os construtores já naquele tempo. No Renascimento Italiano (século XV), Leonardo Da Vinci criou um higrómetro que, por meio de um sistema semelhante ao da balança, podia mensurar a humidade do ar.

Mais tardiamente, já no século XVII, Robert Hooke criou o primeiro higrómetro mecânico; no século XIX, John Frederic Daniell criou o higrómetro de ponto de orvalho que permitia conhecer a temperatura capaz de fazer com que o ar húmido atingisse a saturação. A invenção do psicrómetro por Ernest Felinard August, em 1825, que consistia em dois termómetros, um com bolbo seco e outro com bolbo húmido, permitiu mensurar a humidade relativa do ar.

A partir do século XIX, houve uma percepção ainda maior da importância da humidade, consequentemente da temperatura e da poluição na conservação dos acervos museológicos. Nos museus europeus, sobretudo no inverno, surgiram situações em que, facilmente, se atingem os 90% de HR. Com o aquecimento dos espaços interiores para baixar esses valores, o problema da condensação nas janelas era recorrente. Havia um conflito em garantir a preservação museológica conjuntamente ao conforto térmico (Ferreira, 2008).

A noção de que valores de temperatura a 15°C e humidade relativa aos 60% predominou como “ideal” e dominou a literatura europeia entre os anos de 1930 e 1940 (Ferreira, 2008). Com Paul B. Coremans, um cientista belga do Instituto Real do Patrimônio Artístico, utilizam-se técnicas laboratoriais como a radiografia, termografia, para verificar o grau de conservação do acervo. Inaugurou-se, dessa forma, o conceito da utilização de sistemas mecânicos (como o ar condicionado) para auxílio da manutenção do microclima museológico.

Durante a 2ª Guerra Mundial, os planos dos vários grandes museus europeus de manter a salvo as coleções dos saques inimigos fez com que milhares de peças fossem armazenadas em locais protegidos, como as pedreiras, caso por exemplo da coleção de pinturas da *National Gallery* de Londres. Mantida, secretamente, nos túneis da pedreira de *Manod Mawr*, a qual recebeu algumas modificações (como o aquecimento) para poder receber a coleção em condições mais adequadas. Surpreendentemente, a mina ofereceu um ambiente bastante estável em termos de microclima. Contudo, no regresso das obras de arte ao museu, já no período pós-guerra, o retorno das peças para um ambiente com condições de T e HR mais desequilibradas trouxe uma série de patologias à coleção.

Essa questão da mudança de um ambiente descontrolado para um ambiente controlado é relevante para este trabalho, uma vez que constitui, exatamente, a situação que surge em relação

à readequação de um museu que já esteja em funcionamento e precisa de mudanças no seu microclima. Dessa forma é evidente que o controle dos parâmetros ambientais possibilita a descoberta dos valores médios e dos gradientes temporais, sendo estes fundamentais para uma ótima conservação da coleção (Filippi, 2010).

Segundo Gäel de Guichen, considerado o pai da disciplina da conservação preventiva, também chamada de conservação passiva ou indireta, esta é entendida como o conjunto de ações destinadas à salvaguarda (ou aumentar a esperança de vida) de uma coleção ou de um objeto (Alarcão, 2007).

Em Portugal a inexistência de uma “tradição preventiva” (face a outros países) tem dificultado igualmente as políticas de prevenção (adaptado de Alarcão, 2007). Sendo, nesse caso, a necessidade de uma maior consolidação e engajamento de uma política a nível nacional para o património português. É essencial que este incentivo tenha um carácter voltado para a conservação preventiva para além das práticas de restauro existentes.

2.3 Fatores decisivos de influência nas condições higrotérmicas em museus

Os museus históricos e de grandes dimensões são em geral construções de elevada inércia térmica e esta propicia condições climáticas interiores com características singulares (Lucero-Gómez *et al.*, 2020). Nos edifícios históricos não equipados com sistemas mecânicos de ventilação, o microclima é determinado pela topografia local, orientação das paredes, localização das aberturas e os materiais da construção (Mecklenburg, 2004). Constitui, por outro lado, um desafio conciliar a preservação com as elevadas despesas energéticas em manter sistemas ativos em funcionamento permanente e lidando com grandes volumes de ar, característica comum encontrada nos grandes museus.

A maioria das recomendações de microclimas em museus defende o uso de uma faixa adequada para a temperatura e humidade relativa. Protocolos, também, sugerem um espectro de flutuações para esses parâmetros de acordo com a fragilidade de diferentes patrimônios materiais (Lucero-Gómez *et al.*, 2020). Desde os anos 1960, diretrizes têm sugerido muitas estratégias para coletar informações sobre o microclima dos museus (Lucero-Gómez *et al.*, 2020).

Em certos casos, pode ser viável uma climatização específica de certas vitrines do museu. Dessa forma as peças estão em zonas mais seguras na exposição em relação às flutuações térmicas (Luo *et al.*, 2018). Tal iniciativa tem maior impacto nos grandes museus, apesar de

não deixar de ser uma solução para certos artigos de maior sensibilidade e cuja preservação requiera estratégias de controlo mais rigorosas.

As vitrines expositoras possuem vantagens como: de impedir a passagem do pó, são capazes de fornecer uma estabilização microclimática, reduzir a contaminação microbiológica além de conferirem maior segurança para as peças em termos de furto. Além disso, certos artefatos e relíquias são bastante pequenos, o que torna particularmente atrativo a criação de condições ambientais específicas ao redor da relíquia. Sem a necessidade de todo o volume da sala de exposição estar nas mesmas condições de temperatura, humidade relativa e qualidade do ar. Um sistema de ventilação local pode controlar, de forma independente, o ambiente de uma vitrine em relação ao ambiente do grande salão de exposições (adaptado de Luo *et al.*, 2018).

O próprio acervo do Pavilhão que será abordado no caso de estudo no capítulo 3, possui uma série de equipamentos científicos que eram utilizados para a medição da humidade e da temperatura, como alguns psicrómetros do século XIX. E, para proteger esse acervo, é necessário recorrer aos mesmos conceitos relacionados ao funcionamento desses mesmos equipamentos para que seja possível propiciar um ambiente museológico duradouro. É a ciência a serviço da preservação da sua própria história.

A relação intrínseca entre arquitetura museológica e seu microclima é geralmente ignorada. Sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado (AVAC) são instalados para compensar edifícios com concepções inadequadas em termos físicos para a preservação. A dependência desses equipamentos não apenas gera implicações ambientais e financeiras, mas também aumenta o risco de deterioração do património cultural (Burmester, 2013).

As elevadas flutuações climáticas (T e HR), a que muitos objetos estão sujeitos, podem provocar três tipos de deteriorações: variação dimensional (tamanho e forma), reações químicas ou biodegradações (Fernandes, 2014).

2.3.1 Coleção

Neste subcapítulo foca-se, essencialmente, o tipo de material e o seu estado de conservação. A coleção dita a adequabilidade, ou não, do microclima museológico, baseado conjuntamente nos fatores: clima, localização, a disponibilidade de equipamentos de controlo do ambiente e a capacidade destes de manter as condições estabelecidas (Alarcão, 2007).

A procura por condições higrotérmicas ideais será dependente dos tipos de materiais que compõem a coleção, isto é, cada material possui faixas diferentes de condições higrotérmicas mais adequadas.

Expor uma coleção de objetos em ambientes que estejam distantes das condições mais adequadas pode induzir o surgimento de uma série de deteriorações.

Verifica-se que modificar as condições higrotérmicas de um ambiente museológico que já funciona a décadas em determinadas condições não é tarefa simples. A própria modificação das condições precisa ser avaliada com cuidado, pois pode induzir a uma aceleração repentina da deterioração. É preciso considerar conceito de microclima histórico (ter em conta o microclima que determinado objeto está aclimatado antes de mudar as condições ambientais).

Entende-se como microclima histórico, como uma série de combinações possíveis de parâmetros climáticos exteriores e interiores que caracterizam aquele ambiente interno. Com o passar do tempo, as diversas formas em que o microclima se manifesta diariamente, servem de base para gerar o microclima histórico de um edifício. As estratégias, portanto, de modificação de um espaço pré-existente devem ser discutidas e amplamente analisadas, uma vez que os danos nas obras de arte podem ser irremediáveis.

Num museu que contenha muitas peças metálicas e em madeira é necessário ter a temperatura e a humidade relativa a níveis adequados a ambos os materiais simultaneamente. Nem sempre os materiais que compõem o acervo possuem as mesmas bandas de valores de T e HR, sendo necessário ponderar valores intermédios. Tal gama de valores deve ser tratada no plano de conservação do museu (Quadro 2.2).

A *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE) preconiza a utilização de classes de HR consoante o nível de exigência de determinado plano de conservação de um museu. Sendo reguladas as máximas flutuações e gradientes para as grandezas higrotérmicas.

Segundo o inglês Garry Thomson, em sua obra *Museum Environment*, há certos valores ideais para manter a T e HR interna que rondam entre os 40-70%. Deve-se considerar que altos níveis de humidade geram, quando em contado com o oxigênio, condições adequadas para a oxidação. Portanto, é necessário manter metais em níveis controlados de HR para não induzirem ao processo de corrosão.

Contudo, cabe ressaltar que as gamas de HR indicadas por Thomson são especialmente adequadas para serem seguidas na Inglaterra. Isso, pois a proximidade dos valores de T e HR do microclima com o clima exterior reduz o risco de uma eventual perda do controlo higrotérmico da coleção sofrer tantos danos (adaptado de Camuffo, 2009). Quanto maior foi a amplitude dos valores no tempo maiores tendem a ser os danos, em caso de falha de um sistema mecânico, por exemplo.

Quadro 2.2 – Condições higrotérmicas de referência para objetos museológicos. Valores médios de temperatura e humidade relativa de diversos materiais que constituem os objetos museológicos (adaptado de Ferreira, 2008)

Classe	T [°C]	HR [%]
Armaduras, armamento	15-25	0-65
Marfim, ossos	0-25	20-65
Bronze	15-25	0-60
Papel, pasta de papel	15-25	0-65
Coleções mineralógicas, esculturas e pedras	10-30	0-70
Couro, peles, pergaminho	18-24	35-65
Registos fonográficos	10-60	40-60
Fita magnética	4-21	40-60
Coleções botânicas	18-24	35-65
Filmes e fotos a cores	-5-15	0-50
Filmes e fotos a preto e branco	-5-20	0-60
Insetos e caixas entomológicas	15-24	40-65
Madeira	15-25	35-65
Livros, manuscritos	12,8-24	0-65
Materiais plásticos	19-24	30-50
Metais, ligas, latão, prata, chumbo, cobre e liga de estanho	20-25	0-65
Mobiliário embutido e lacado	19-24	35-65
Ouro	21-23,5	0-55
Pinturas, murais	6-25	45-65
Papiros	21-25	0-65
Pastel, aquarelas, desenhos	6-24	0-60
Impressões	19-25	0-65
Pelos e penas	15-25	25-60
Tecidos pintados	0-24	35-65
Porcelanas, cerâmicas, grés e terracota	16-30	0-70
Seda	2-25	30-65
Têxteis, carpetes, tapeçarias	2-25	35-65
Vidros	18-23,5	0-60

É, também, importante controlar e reduzir o risco da condensação. Esta, quando verificada nas superfícies frias (sobretudo parede envolvente externa), poderá afetar a qualidade do ar bem

como danificar parede, ornamentos em madeira que estejam próximos aos envidraçados, uma vez que, dependendo dos níveis, o gotejamento é muito elevado.

Determinadas configurações do microclima e suas variabilidades temporais determinam certas quantidades de trocas físicas, químicas e biológicas que diretamente ou indiretamente podem criar novos danos ou intensificar os danos existentes (adaptado de Camuffo, 2009).

As tabelas oferecem informação útil, podendo inclusive ser colocada em normas para controlo das gamas de valores. Contudo, estas funcionam para os materiais (como metais, minerais, cerâmicos), mas não funcionam bem para os materiais orgânicos higroscópicos¹ (adaptado de Camuffo, 2009) variando o nível de referência consoante o tipo de madeira.

Apesar da referência de valores mais adequados consoante o tipo de material, é mais relevante, ainda, para a preservação, considerar a aclimação dos materiais, sendo possível a intervenção de outras maneiras para mitigar os danos. Não sendo muitas vezes adequada e suficiente a decisão de instalar um AVAC que, simplesmente, respeite os limites da tabela.

Se a coleção se apresenta em bom estado de conservação, não necessariamente deve ser modificado o microclima, mesmo que esses valores estejam fora dos intervalos recomendados como sendo ideais. Observa-se que muitas das tabelas de referência possuem valores colhidos para as situações observadas em outros países e nem sempre se enquadram bem na realidade climática portuguesa.

2.3.2 Edifício

O edifício consiste em ser a fronteira entre lado interior e o exterior. Tem um papel relevante, pois as características da construção em si têm influência direta no comportamento higrotérmico no seu interior. A orientação das paredes, localização das aberturas e os materiais da construção (Mecklenburg, 2004) são algumas dessas características que devem ser levadas em conta.

A inércia térmica do edifício também tem papel fundamental de atenuar o impacto das grandes amplitudes térmicas diárias. Está diretamente ligada ao material de construção e seu comportamento face às trocas de calor. Os edifícios antigos de grandes museus são interessantes no ponto de vista do microclima dada a sua grande inércia térmica, característica facilmente encontrada nas construções antigas.

¹ Como madeira, celulose, entre outros

Nos casos dos grandes museus, é comum encontrar grandes salões descomunais, muitas vezes com alvenaria de pedra, o que cria um ambiente interior menos suscetível às variações térmicas exteriores e aos efeitos das visitas do público devido ao grande volume de ar acumulado no interior.

A orientação das paredes também pode condicionar uma maior ou menor troca de calor com o meio externo, assim como as paredes voltadas ao Sul terão comportamento diferente das voltadas à Norte por conta da exposição solar. O edifício pode propiciar uma maior ventilação natural de acordo com a sua planta e esta pode ser uma ventilação do tipo cruzada. Trata-se de um aspecto importante para dissipar um excesso de humidade relativa no interior por meio das trocas de ar com o exterior. Um projeto para um novo museu deve ter em conta o papel relevante que estas escolhas têm na regulação do microclima. Deve-se aliar as boas práticas arquitetónicas à necessidade intrínseca da conservação.

A própria higroscopicidade dos materiais internos de um museu tem um papel relevante em atenuar as variações mais abruptas de humidade relativa, que, aliada à inércia térmica, são características do edifício capazes de moderar o microclima. De modo geral, o edifício pode ter grande contributo para um controle passivo da humidade relativa, reduzindo a dependência de certas soluções mecânicas.

A potencialidade de um edifício ter seu microclima controlado dependerá de diversos fatores, tais como a inércia térmica, nível de isolamento térmico, permeabilidade ao ar, tipologia (Filippi, 2010).

2.3.3 Visitas

Sendo um espaço aberto ao público, é expectável que haja visitas periódicas e que estas afetem os pequenos espaços museológicos, isso porque tratam-se de espaços com área reduzida (naturalmente com baixo volume de ar) e que podem afetar a coleção de alguma forma.

Com isto, os grupos que diariamente visitam esses locais induzem a modificações nas condições ambientais, claramente em função da quantidade de pessoas e grupos, do tempo que permanecem no interior do recinto, das frequências e das condições ambientais de ventilação.

Durante as visitas, pode ocorrer, sobretudo, um aumento repentino da humidade relativa. Pode-se esperar também alguma modificação na temperatura interna. Conforme o Quadro 2.2, pode-se verificar que pequenas variações de T e HR podem afastar os materiais da gama de valores ideais e induzir determinados comportamentos inadequados à coleção.

Uma estratégia é determinar a flutuação máxima possível que uma coleção pode suportar em termos de T e HR. Para isso é necessário controlar as condições higrotérmicas dos espaços museológicos por meio de campanhas de medição. Assim, é possível estabelecer as condições presentes e adequar a quantidade e periodicidade das visitas em função do que a coleção pode suportar.

2.3.4 Clima exterior

O clima exterior local influencia a T e H do microclima dos museus, e, consoante o nível de ventilação, é possível haver diferenças maiores ou menores nos níveis de humidade. Claramente, essa diferença será função da quantidade de vapor produzida no interior e do grau de ventilação do local. Para verificar a fiabilidade dos sensores, pode-se comparar os dados de T e HR das estações meteorológicas com os dados colhidos no exterior de um museu.

Uma vez que a quantidade de vapor de água no ar é máxima, isto é, atingiu-se ponto de saturação, ocorre a condensação (no exterior chamada de precipitação). É notável que, no planeta, as regiões mais húmidas tenham maiores índices pluviométricos e, justamente em virtude de sua HR estar mais próxima da curva de saturação, é mais frequente chover. Nas regiões mais secas, os baixos valores de HR, possibilitam raramente atingir-se o ponto de saturação, dessa forma chove com menor frequência.

A própria quantidade de vapor de água no ar é responsável por estabilizar as temperaturas climáticas, moderando as amplitudes térmicas quando se tem grandes quantidades de humidade no ar. Num deserto, por exemplo, por haver baixos níveis de humidade, verificam-se elevadas amplitudes térmicas diárias.

O assunto é de tal importância que, segundo a OMS (Organização Mundial de Saúde) para valores de HR demasiado baixos (cerca de 12%), aconselha-se, por razões de calamidade pública, a determinação de estado de emergência, o que implica uma paralisação temporária das atividades urbanas.

A influência do clima exterior no microclima será amplamente dependente da envolvente externa que o edifício exerce como fronteira, bem como os materiais que a constituem. Deverão ser comparados dados de distribuição de T e HR no exterior e interior do edifício ao mesmo tempo para verificar a influência do clima exterior num microclima.

Fatores relacionados ao clima exterior vão muito além, apenas, dos valores de T exterior e HR. Pode-se considerar, conjuntamente, a pressão de vapor, a radiação, a velocidade do vento, a direção do vento e a pluviosidade. Isto porque esses fatores influenciam o microclima. Essa

influência pode ser mais importante nos casos de envolvente externa muito permeável. A análise deve contemplar, portanto, o edifício, conforme elucidado anteriormente.

2.4 Medições higrotérmicas

As medições higrotérmicas podem ser feitas por meio de equipamentos de medida como: termómetros, higrómetros e psicrómetros. Abaixo será descrito sucintamente o funcionamento destes. Atualmente, há dispositivos eletrônicos, os *data loggers* (Figura 2.1), que registam, de maneira digital, os dados colhidos ao longo do tempo.

Os termómetros podem ser analógicos, digitais ou infravermelhos. Os analógicos funcionam com uma escala de T chamada zona do capilar, um bolbo (local onde há substância termométrica) no qual um líquido é conduzido a determinados níveis de acordo com a sua T, o que fornece numa determinada escala os valores das medições. Os termómetros digitais fazem a leitura de T por meio de uma ponta com sensor e de acordo com a resistência elétrica gerada no seu interior. Já os termómetros infravermelhos medem a radiação emitida pela fonte de calor.

Higrómetros medem a quantidade de humidade contida no ar. Para isso utilizam substâncias que absorvem humidade do ar e, de acordo com a quantidade de humidade absorvida, indicam por meio de um ponteiro, o valor referente à leitura de HR. O cabelo (nos equipamentos antigos) e os sais de lítio (atualidade) são exemplos de materiais utilizados nos higrómetros.

Os psicrómetros tradicionais possuem dois termómetros analógicos que medem a T tanto de bolbo seco quanto a de bolbo molhado. A diferença das leituras entre ambos relaciona-se à quantidade de humidade contida no ar. A T no bolbo molhado será tanto menor quanto mais seco estiver o ar, pois a água evapora com maior facilidade em ambientes mais secos. Dessa forma o bolbo molhado perde mais energia e reduz a sua T. A evaporação está associada a uma redução à T da superfície evaporante. Sendo maior a redução quanto maior a queda de T.



Figura 2.1 – *Data logger* (Smart Gadget Sensirion) Fonte: RS Components@. (2018)

Os medidores digitais (*data loggers*) são equipamentos capazes de armazenar grandes quantidades de leituras de T e HR. É possível, assim, ter dados em intervalos desejados, com leituras a cada 10 minutos, ou outro intervalo arbitrário, por exemplo. Podem-se, também, realizar medições periódicas ao longo de meses. Com base na transmissão de dados via *bluetooth*, é possível fazer um levantamento de dados. Cada equipamento destes varia a sua precisão, o que deve ser considerado no manual do fabricante. Sabe-se que há equipamentos muito mais precisos que outros e isto pode afetar a validade das medições.

As diversas leituras podem servir de fonte para diversos estudos, uma vez que possibilitam a obtenção das flutuações diárias, máximos, mínimos, médias, mediana, frequências de distribuição, entre outras finalidades. Essas informações podem ser obtidas numa fase seguinte de tratamento de dados. Uma vantagem em relação aos outros equipamentos de medição é que esses dados podem ser extraídos em formato de texto, facilitando a etapa dos tratamentos de dados.

2.5 Diagrama psicrométrico

A temperatura e a humidade relativa modificam as características do ar interior nos espaços fechados. A construção tem sempre um papel relevante como intermediadora do clima exterior (influenciado pelos agentes climáticos) e do clima interior, geralmente chamado de microclima. Fatores como o material das paredes, o isolamento, o nível de estanqueidade das janelas e ventilação influenciam a forma como o clima exterior se manifesta no interior dos edifícios.

Aspectos internos relacionados ao tipo de ocupação do ambiente, quantidade de pessoas e atividades, também têm sua influência no microclima. Quando os padrões de utilização são fora dos habituais, estes podem propiciar o aparecimento de condensações nos envidraçados, excesso de humidade interior, ou até mesmo surgimento de bolores nas superfícies mais frias da envolvente exterior.

A utilização do diagrama psicrométrico permite avaliar diferentes situações ambientais e com base em parâmetros psicrométricos modificar as condições do ar de maneira a chegar nas condições desejadas. Esse diagrama é utilizado nos softwares dos sistemas de ar condicionado.

Os parâmetros psicrométricos são: temperatura de bolbo húmido, de bolbo seco, de ponto de orvalho, humidade relativa, humidade absoluta, volume específico e entalpia. Conforme será abordado nesta seção, ao possuir dois parâmetros psicrométricos, já é possível conhecer o ponto do gráfico que identifica as condições ambientais presentes e, com isto, conhecer os outros cinco parâmetros psicrométricos associados.

Um conceito relevante é diferenciar a humidade absoluta da humidade relativa. Enquanto a primeira consiste na determinação da quantidade total de vapor de água [kg água/kg ar seco] presente no ar, a segunda consiste em determinar a percentagem de humidade presente no ar face à quantidade máxima que este ar pode suportar de humidade sem precipitar, isto é atingir a curva de saturação. Essa diferença ocorre, pois, a quantidade máxima de humidade que o ar pode suportar varia conforme a temperatura.

A temperatura do ponto de orvalho é um indicador para prever a condensação. Se esta é próxima à temperatura no interior significa que há humidade suficiente para naquela temperatura poder haver condensação.

A partir das variáveis psicrométricas T e HR, é possível calcular sucessivamente a pressão de vapor saturado

$$p_s[Pa] = 610,5 Pa \times e^{\frac{17,269 \times T[^{\circ}C]}{237,3 + T[^{\circ}C]}} \quad (1)$$

a pressão de vapor de água no local

$$p_w = \frac{HR[\%]}{100} \times p_s \quad (2)$$

e a humidade absoluta

$$w[kg \text{ água}/kg \text{ ar seco}] = \frac{0,62198 \times p_w[Pa]}{(101325 - p_w[Pa])} \quad (3)$$

Uma vez que os parâmetros ambientais variam, substancialmente, ao longo do tempo, é necessário ter períodos de coleta de dados com dimensão suficiente para ser capaz de possibilitar a noção do comportamento higrotérmico local. As grandezas medidas e a forma como se distribuem no tempo são relevantes para a perceção do ambiente.

Num espaço fechado, onde as trocas de ar são lentas, um aumento de T pode baixar significativamente os valores de HR e vice-versa. T e HR são inversamente proporcionais, ou seja, um aumento da HR num determinado espaço, pode-se reduzir a T ou introduzir vapor de água. Se for necessária a redução da HR, pode-se aquecer o espaço ou retirar vapor de água (Alarcão, 2007), conforme Figura 2.2 em que, com o aumento de T, é necessário que haja mais vapor de água para se chegar à saturação.

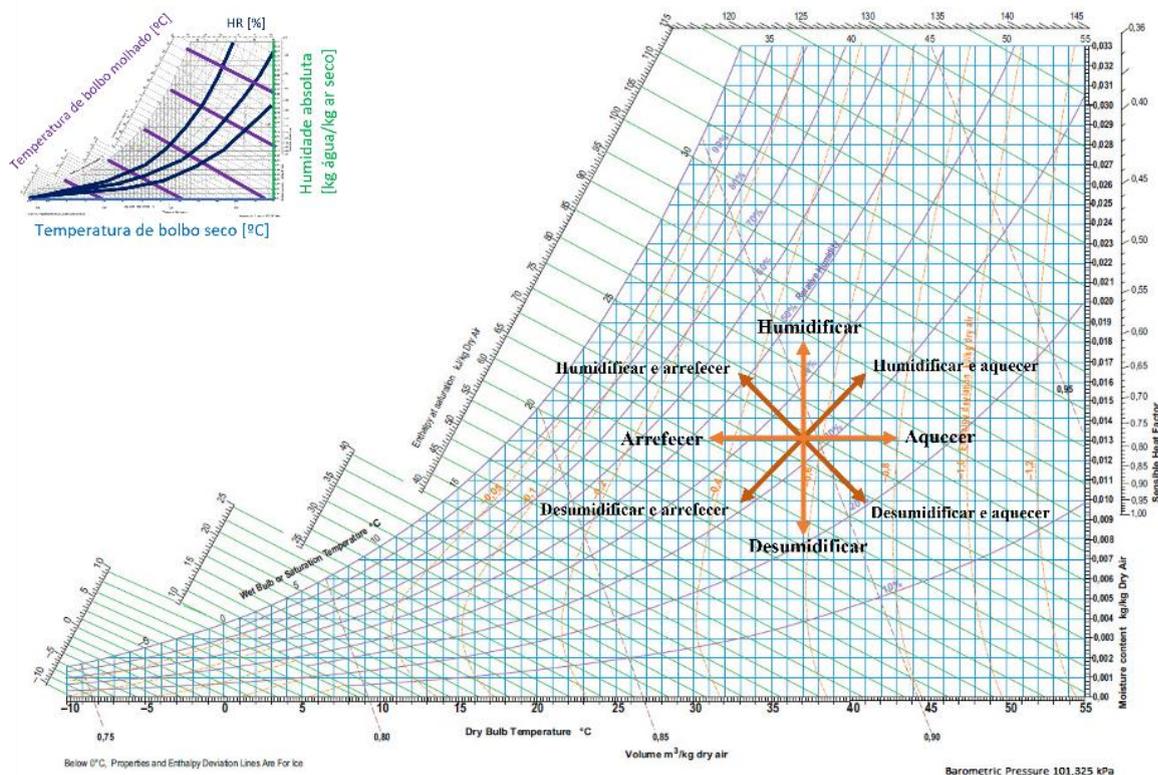


Figura 2.2 – Diagrama psicrométrico. Adaptado de Kalume@. (2020)

2.6 Alternativas passivas para controlo higrotérmico

Certas características dos materiais e dos sistemas construtivos podem modificar o comportamento do edifício, como é o caso da inércia higroscópica e da inércia térmica. Estas podem ser importantes aliadas à conservação das peças, uma vez que são capazes de interferir na maneira como a variação da T e HR atuam.

É estratégico tirar partido dessas soluções passivas. Especialmente em virtude de, nos museus antigos, encontrarem-se, geralmente, construções de elevada inércia térmica e estas terem a possibilidade de regular o microclima. Isto pode reduzir a dependência de soluções ativas, o que constitui uma alternativa mais sustentável do ponto de vista ambiental, económico e da própria conservação. “O controlo através de meios passivos, como a inércia higroscópica do próprio edifício é um método a ter em consideração (...) essencialmente por questões energéticas e económicas” (Ferreira, 2008).

O conceito de Inércia Higroscópica surge associado ao de materiais higroscópicos e define-se como a capacidade que uma sala ou um edifício tem de moderar as variações da humidade relativa do ambiente interior. Essas variações podem ser diárias ou sazonais (Ferreira, 2008).

Materiais higroscópicos são capazes de armazenar humidade no seu interior. Quando esse material liberta a humidade para o ar, esse processo não se dá instantaneamente, de modo que atenua as mudanças bruscas das condições higrotérmicas.

Entende-se por inércia higrotérmica a capacidade de um edifício em dissipar no tempo determinado fluxo de calor e de HR. A aptidão de um edifício em mitigar, rapidamente, as flutuações de T e HR é conhecida como inércia higrotérmica (Lucero-Gómez *et al.*, 2020).

Como a inércia higrotérmica interfere na dinâmica das trocas de calor e humidade, pode-se tirar partido dela, uma vez que é tão frequentemente encontrada nos antigos museus. Muitos estudos têm sido conduzidos de modo a avaliar a inércia higrotérmica nos edifícios de museus históricos, com um foco por exemplo na avaliação de risco (Lucero-Gómez *et al.*, 2020). Sendo esta, aliada ao conceito de microclima histórico, essencial para a tomada de decisão de modificar o ambiente interior.

Ao moderar as flutuações diárias de temperatura, um edifício expõe a coleção a menores variabilidades térmicas. Isto é particularmente interessante no ponto de vista da conservação. Além disso, um edifício de elevada inércia térmica possui temperaturas mais baixas em comparação a outros edifícios de baixa inércia térmica. As temperaturas mais baixas reduzem a propagação de microorganismos e de outros mecanismos de degradação.

2.7 Desafios da escolha da faixa higrotérmica adequada

Conforme a seção anterior, referente aos itens da coleção, dependendo do tipo de material, a coleção apresenta faixas higrotérmicas mais adequadas. É relevante considerar que a avaliação do estado geral de conservação das peças do acervo (de modo empírico) pode trazer uma noção do atual comportamento das peças face às condições do ambiente.

Nos casos que se julgue necessário fazer grandes modificações aos níveis higrotérmicos encontrados, é fundamental ter cautela, em virtude de as peças da coleção estarem ambientadas a essas determinadas condições. Artefatos de património cultural ficam condicionados a esse específico microclima e desenvolvem, ao longo do tempo, diferentes modificações físicas e químicas. Esse processo é conhecido como aclimação (Lucero-Gómez *et al.*, 2020). Modificar as condições microclimáticas implica considerar o efeito da aclimação e com uma avaliação de risco elencar algumas estratégias para mitigar os riscos dessa mudança ambiental.

Em ambientes nos quais é verificada a necessidade de readequação muito elevada em termos de HR, são necessárias precauções para que as peças não sofram danos irreversíveis devido às

variações de HR. Isto claramente é função do material, da sensibilidade do artefato, mas também da forma como se varia a humidade no tempo, isto é, mudanças mais abruptas tendem a ser mais críticas ao acervo.

De um modo geral, os danos ocorrem para valores de HR inferiores a 25% e superiores a 75%. Contudo, são determinantes, de fato, para o estabelecimento de valores de HR e T, a natureza do material e o seu estado de conservação (Alarcão, 2007). Normalmente, os objetos museológicos não reagem muito bem a variações bruscas das condições higrotérmicas interiores, principalmente da HR (Ferreira, 2008).

Muitos pesquisadores sugerem gamas de valores higrotérmicos adequados para museus. Também é possível consultar normas que definem algumas soluções padrões. Contudo, elas não garantem a conservação, sendo necessários outros estudos complementares para aferir a adequabilidade destas soluções no museu em causa.

É preciso considerar a própria norma que tem a finalidade de determinar, de forma clara e consistente, níveis adequados de HR e T. Estas nem sempre fornecem a solução mais adequada ao acervo. Especialmente ao se considerar que certas soluções viáveis em termos de preservação da peça estão em desacordo com o conforto higrotérmico.

Dessa forma, é necessário pesar as escolhas de modo a avaliar as prioridades de cada museu caso a caso. Especialmente porque as próprias necessidades do ambiente interno variam conforme a localização e clima. Assim, dificilmente, se pode encontrar uma mesma faixa de valores a ser aplicada nos museus dos países nórdicos e ao mesmo tempo nos museus mediterrâneos.

Determinados intervalos fixados pelas normas parecem ser condicionados muito mais pelo conforto dos visitantes do que propriamente pelas necessidades conservativas (adaptado de Camuffo, 2009). De modo que há certos intervalos fixados pela norma que poderiam ser diferentes caso o único objetivo desta fosse o da conservação.

Tal situação envolve uma série de fatores a serem tidos em conta devido à complexidade do assunto. Dessa forma, simplesmente seguir a norma não é garantia de conservação. Muito pelo contrário, pode parecer paradoxal, mas há situações em que seguir a norma pode acarretar graves danos às coleções. É preciso verificar, caso a caso, sendo insuficiente a generalização de um padrão a ser seguido em locais com características climáticas tão distintas.

Não se pode dizer que há soluções gerais a seguir em termos de microclima. Há limites dentro dos quais a preservação museológica está assegurada (Alarcão, 2007). Mas isso não significa

propriamente que, fora desses limites, a coleção também não esteja assegurada, pode estar e dependerá de outros fatores e estudos. Conforme enunciado, mais do que valores de referência, deve-se ater ao tipo de material e estado de conservação das peças. Para tal, abaixo são referidos dois tipos de materiais que têm bastante importância para o caso de estudo do capítulo 3.

2.7.1 Madeira

Há casos em que seguir a norma cegamente pode comprometer a coleção. Considerando-se o caso de Veneza, onde há elevados níveis de HR e, segundo a norma, para chegar aos valores padrões, ter-se-ia que reduzir cerca de 30-40% a HR. Essa variação traria graves danos às coleções (adaptado de Camuffo, 2009).

Surgem situações que evidenciam a complexidade e a dificuldade relacionada à decisão de se modificarem, seriamente, as condições microclimáticas de um museu. Há duas razões para manter as condições ambiente interiores tão perto quanto possível da média das condições exteriores. Seja qual for a localização do museu, primeiramente porque a madeira velha ou nova está adaptada à HR habitual e, em segundo lugar, porque, quanto mais perto estivermos das condições exteriores, menor serão os custos de funcionamento do ar condicionado (Thomson, 1986).

A diferença entre os valores de HR dentro e fora de um museu pode ser tão elevada que provoca sérios danos no acervo em qualquer falha do sistema ativo de AVAC. A madeira presente nesses ambientes seria fortemente impactada pela variação tão intensa, promovendo sérios danos como a formação de fissuras.

É relevante compreender que a variação de HR do ar é transmitida para o material higroscópico, como é o caso da madeira. Contudo, essa variação de HR não é uniforme em todo o material. Os estratos mais profundos da madeira não têm contacto com a mesma quantidade de humidade. Tal processo gera modificação do volume desta e, por ser um material anisotrópico, terá comportamento diferente conforme a direção. Surgem, então, fissuras para equilibrar os movimentos induzidos pela variação de humidade.

Caso a modificação higrotérmica seja elevada, deve-se considerar que esta pode ser feita em uma velocidade mais lenta. Isso, pois a mudança vagarosa das condições permite controlar a evolução de possíveis danos ao longo do tempo. Infelizmente, uma grande modificação higrotérmica não impede o dano, apenas reduz sua intensidade (adaptado de Camuffo, 2009).

2.7.2 Metal

Certos materiais como os metais requerem especial atenção quanto a sua conservação. Os metais são recobertos de vários estratos de moléculas de água que formam uma camada sobre a superfície exposta cobrindo-a progressivamente (Leygraf, 2001). A espessura dessa camada de filme cresce conforme aumentam-se os níveis de humidade relativa.

Quando há baixa HR, as camadas de moléculas ficam fortemente ligadas, e pode ser considerado estado sólido. Diferentemente, quando são geradas muitas camadas de filme (em condições de elevada humidade), as mais exteriores aproximam-se do estado líquido e isto oferece um enorme risco ao metal (adaptado de Camuffo, 2009). As condições de risco geradas favorecem a ocorrência de reações químicas, facilitando a oxidação. Os microrganismos em contacto com a água encontram boas condições para desenvolverem-se, o que desencadeia sérios riscos de degradação aos materiais metálicos.

No entanto, caso sejam tomadas decisões menos adequadas do ponto de vista do conforto higrotérmico pode-se obter condições ambientais mais adequadas para as peças. Por exemplo, no caso dos metais, em relação à redução da HR e T, reduz-se, também, a formação dos filmes de moléculas de água o que, por sua vez, dificulta a formação e desenvolvimento de microrganismos (adaptado de Camuffo, 2009).

2.8 Noções gerais de conforto higrotérmico na perspectiva do ambiente interno

Os níveis higrotérmicos podem ser ajustáveis quer ao conforto humano, quer à conservação dos objetos expostos nos museus. Contudo, no que diz respeito a estes, é mais importante ajustar as condições climáticas aos objetos museológicos do que ao conforto humano por questões de preservação/conservação (Ferreira, 2008).

A HR do ar entre 40-60% mostra-se ótima para a saúde humana, desempenho no trabalho e um menor risco de infeção (Wolkoff *et al.*, 2021). O estudo do microclima possibilita um conhecimento sobre as flutuações paramétricas durante determinados períodos. Estes devem ser suficientemente longos em termos temporais para que seja possível extrair o comportamento do edifício em diversas combinações climáticas exteriores.

A ventilação é um fator de modificação que deve ser integrado com a humidade do ar interno e com a temperatura ambiente, num conjunto estratégico para satisfazer a perceção da qualidade do ar interno, saúde, desempenho de trabalho e minimizar o risco de infeção (Wolkoff *et al.*, 2021). Em termos da perspectiva do ser humano, em humidades relativas inferiores a 40%, o ar

está excessivamente seco; numa faixa de 40-60%, o ar está em nível confortável ao ser humano; acima de 60% o ar fica bastante húmido.

A própria sensibilidade do corpo humano face a temperatura ambiente modifica-se em função dos níveis de humidade do ar. Isto é, quanto maior a humidade relativa, percebe-se, maior calor num ambiente. Se esse mesmo ambiente estiver com a mesma temperatura, porém com baixa humidade relativa, haverá a sensação de que a temperatura está mais amena. Esse fenómeno está relacionado com a maior dificuldade de o corpo transpirar num ambiente demasiado húmido, o que impede o arrefecimento do corpo e transmite a sensação de maior calor.

Existem normas que avaliam as condições de fatores ambientais e da ocupação, como é o caso da norma americana ASHRAE 55. Com esta, pode-se avaliar se são garantidas as condições térmicas adequadas aos utilizadores (requisitos mínimos de conforto térmico) para além dos valores necessários para a preservação.

2.9 Normativas sobre conservação museológica

Como referência pesquisaram-se algumas normativas de conservação museológicas, utilizaram-se normas italianas devido ao fato de a Itália ter grande tradição na conservação museológica. No Decreto Ministerial 10/05/2001 (D.M. 10/05/2001), evidenciam-se critérios técnico-científicos e padrões de funcionamento e desenvolvimento de museus. Pode-se citar, também, a norma UNI² 10829, a qual se destina a bens de interesse histórico e artístico, condições ambientais de conservação, medições e análises (Filippi, 2010).

Contudo, as normas apresentam algumas limitações. A UNI 10829, por exemplo, se baseia muito em cada tipo de material, mas não propriamente no fato de os objetos possuírem, em certos casos, como livros e artefatos de madeira, uma combinação de materiais, como é o caso dos artefatos compósitos. A norma UNI 10969 corrige isto, e aumenta a temperatura mínima necessária para um museu. Mesmo que esta não seja a mais adequada para a conservação, mas sim por ser mais adequada ao conforto humano (adaptado de Camuffo, 2009).

Da norma italiana, destaca-se o D.M. 10/05/2001: Âmbito VI – Gestão e cuidados com a coleção, na qual a gestão e conservação das coleções museológicas devem prover de elementos imprescindíveis relativos às conservações, restauros, exposições permanentes, exposições temporárias e empréstimos. Destaca-se o artigo 1, intitulado, conservação e restauro. Devem ser observados precisos critérios de conservação preventiva. Primeiramente, por meio do

² *Ente Nazionale di Unificazione* – Órgão Nacional de Estandarização

monitoramento das condições ambientais, e, em segundo lugar, pelo princípio do restauro e da manutenção, com o objetivo de garantir a segurança e a plena fruição dos artefatos museológicos (D.M. 10 *maggio*, 2001).

As normas possuem alguns elementos em comum como designar o nível, ou limite de variabilidade microclimática a obter, como executar as medições ou como possibilitar condições de segurança ambiental para as obras (adaptado de Camuffo, 2009). Contudo, é necessário ser cauteloso em relação às diretrizes da norma. Se não há informação diversa, pode-se, simplesmente, seguir as informações da tabela – substituir por: em caso de precisar ter informação do microclima a ser respeitado deve-se procurar conhecer e desvendar o microclima histórico, pois este sim acompanhou o objeto ao longo de sua vida e permitirá tirar conclusões mais seguras em termos de variações do microclima a níveis seguros ao acervo (adaptado de Camuffo et al., 1979). Como se viu anteriormente, seguir unicamente a norma não é garantia de conservação. A ASHRAE também desenvolveu normas para o dimensionamento de sistemas AVAC para o microclima de museus, galerias, arquivos e livrarias.

3. INTRODUÇÃO AO ESTUDO DE CASO

3.1 Enquadramento geral e organização do capítulo

O Pavilhão do Círculo Meridiano do Observatório Geofísico e Astronómico da Universidade de Coimbra é escolhido como caso de estudo para verificação das condições higrotérmicas. Foi escolhido por ser um pequeno espaço museológico com elevada inércia térmica e com um acervo muito precioso, o qual mostra o papel da Ciência na História da Universidade de Coimbra. Neste capítulo pode-se compreender a sua história, as suas características, o edifício, a importância do acervo e seu estado de conservação, explicações sobre o método de medição adotado bem como sua precisão e o tratamento de dados.

Os resultados dos ensaios experimentais realizados no estudo de caso são exibidos e discutidos no capítulo seguinte. Os valores de temperatura e humidade relativa colhidos ao longo dos meses de fevereiro, março, abril e maio de 2021 servem de base para a análise do microclima.

3.2 Contextualização histórica do edifício e do acervo

O acervo museológico, que agora encontra-se no Pavilhão do Círculo Meridiano, foi transferido das antigas instalações do Observatório Astronómico situado na lateral Sul do Paço das Escolas da Universidade de Coimbra. As peças que se encontram neste museu são amostras evidentes da História da Ciência uma vez que se tratam de aparelhos experimentais (chamados na época de máquinas) para estudo e investigação.

Com o despertar do Iluminismo, muitas foram as interferências do Marquês de Pombal na já antiga Universidade de Coimbra. Foram dados comandos de mudança, uma série de reformas nos cursos, no corpo docente e também nas ciências estudadas. Em decorrência da Reforma Pombalina, surge em 1799 o antigo edifício do Observatório Astronómico.

O Observatório é uma amostra do engajamento da Universidade com as práticas da ciência experimental, cada vez mais difundida durante o século XVIII. Nessa época, muitos equipamentos científicos são adquiridos e passam a fazer parte das novas instalações da Universidade. Alguns desses equipamentos fazem parte do acervo do Pavilhão.

Por volta de 1785-1787 encontra-se reunido praticamente todo o acervo instrumental indispensável à efetiva função e atividade astronómica que se pretendiam para um verdadeiro

estabelecimento científico tal como os Estatutos estipulavam, nomeadamente a elaboração das efemérides astronómicas ³(Estatutos da Universidade, 1792).

A ideia de aliar o conhecimento teórico ao prático foi impulsionada com os equipamentos experimentais. Surgiu na época a ideia de que um professor deve fazer demonstrações. Nota-se que as máquinas, muitas vezes, possuem ornamentos numa visão de unir arte e ciência. Por meio dessas máquinas conseguiam-se extrair as respostas da própria natureza, possibilitando ver os astros e realizar as efemérides de Coimbra, que era uma espécie de diário dos acontecimentos quotidianos do céu.

Após cerca de 150 anos no Paço das Escolas, durante o governo de Salazar, deu-se ordem para a criação de um novo local, com maior área e melhores condições para o Observatório. Foi escolhida uma área na freguesia de Santa Clara (Coimbra) na outra margem do Rio Mondego para abrigar as novas instalações. Conjuntamente com a iniciativa, foi demolido o antigo Observatório do Paço e seu acervo instrumental foi transferido para o Pavilhão do Círculo Meridiano (Figura 3.1), que é tratado nesta dissertação.

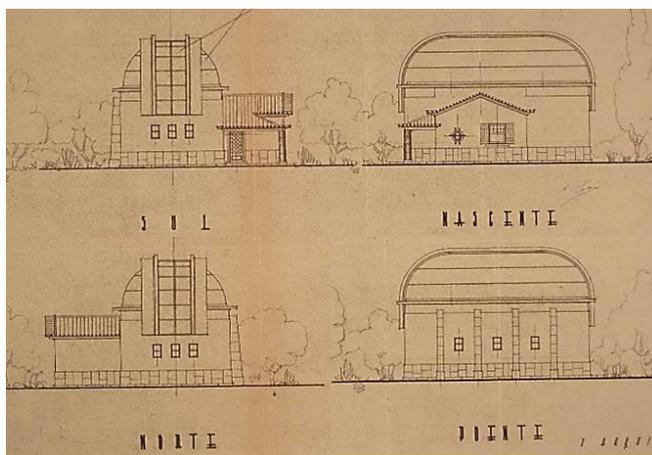


Figura 3.1 – Projeto original do museu do Pavilhão do Círculo Meridiano do Observatório Geofísico e Astronómico da Universidade de Coimbra (OGAUC).

Fonte: Imagens cedidas pelo OGAUC

O atual edifício possui algumas alterações em relação a essa planta como o alongamento da zona anexa ao salão da cúpula retrátil. As fachadas estão perfeitamente alinhadas a Norte, Sul, Leste e Oeste devido ao fato de este edifício ser o edifício da Meridiana de modo que o teto aberto permita ampla visão da meridiana.

³ Indicação da posição dos astros diariamente

3.4 Acervo, mobiliário e patologias

Os armários expositores (vitrines), feitos de madeira (Figura 3.2 (a)), que fazem parte do acervo (provavelmente de pau santo oriundo do Brasil) são antigos e muito ornamentados. Dentro deles, uma ampla quantidade de equipamentos científicos são expostos. Além disso, muitos elementos em madeira são utilizados como base nesses instrumentos. O mobiliário vai desde mesas que servem de suporte aos equipamentos (Figura 3.2 (b)), a revestimentos, escadas, bancos, poltronas até as vitrines.

As mesas e armários possuem certos elementos com marchetaria. É necessário um estudo mais aprofundado para averiguar todos os tipos de madeira presentes no acervo, uma vez que pode haver peculiaridades no comportamento higrotérmico consoante o tipo de madeira. Caso sejam submetidas a variações dimensionais, devido a elevadas mudanças de HR, as peças podem afetar umas às outras (por estarem encaixadas entre si), o que pode trazer danos.



Figura 3.2 – Armário expositor (a), local onde foi colocado o sensor interno II para medições higrotérmicas. Encontra-se em bom estado de conservação. Equatorial portátil (b). Materiais: madeira, latão e vidro, construtor William Carry, Londres, 1781. Bom estado de conservação

O mobiliário constituído, sobretudo em madeira, apresenta-se num bom estado de conservação, não possui sinais de danos capazes de serem relacionados com os níveis de HR e com a T. Observa-se que o pavimento do edifício também é de madeira.

A combinação de materiais presentes no acervo, sobretudo entre tipos de madeira e entre elementos metálicos, gera uma maior precaução em termos do controle higrotérmico. Uma vez que os intervalos tidos como ideais para a conservação das peças variam conforme o tipo de material. Para mais fotos do acervo e do salão do Pavilhão, consultar o Anexo A.

Muitos materiais higroscópicos como a madeira reagem, rapidamente, a variabilidade microclimática e os danos que podem ser derivados disto no mobiliário dependem da amplitude, da duração e da frequência com a qual se repetem os ciclos higrotérmicos (Bratasz-Kozłowski, *et al.*, 2005). Muitos dos objetos da coleção são compostos por madeiras e metais, os quais podem ser indissociáveis, o que requisita encontrar condições adequadas para ambos os materiais ao mesmo tempo.

São notáveis os estados de degradação de alguns objetos, mas, apesar de tudo, a coleção apresenta-se de modo geral num bom estado de conservação. Fundamental será acompanhar as patologias existentes e mapeá-las de modo a acompanhar sua evolução e com isto interrelacionar com as práticas impostas ao controlo higrotérmico. Assim, pode-se inferir se a melhora das condições higrotérmicas manifesta-se na conservação das peças.

O acervo é composto sobretudo por peças metálicas de pesquisa científica conjuntamente a móveis e acessórios em madeira. Esses metais são, principalmente, ligas metálicas, latão, cobre, bronze. Como se sabe, os elevados níveis de HR podem induzir e intensificar o processo da corrosão. Não se pode afirmar, ao certo, se a corrosão desses equipamentos iniciou-se no Pavilhão. Para tal seriam necessários registos do estado de conservação ao longo do tempo. Sabe-se que estão nesse espaço desde a década de 50 do século XXI e que alguns itens foram emprestados para exposições científicas por todo o mundo. Na Figura 3.3, apresentam-se processos de degradação no acervo.

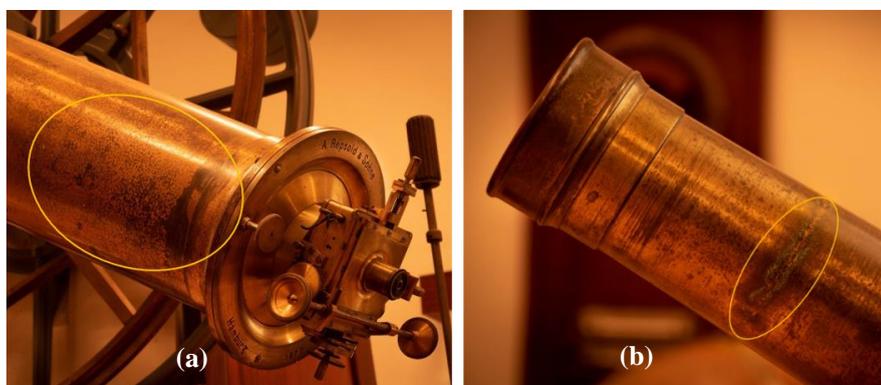


Figura 3.3 – Manchas escurecidas (a), pode ser alguma patologia associada a HR. Processo de corrosão numa das peças do acervo (b)

3.5 Localização e clima

O edifício está localizado em Coimbra, na freguesia de Santa Clara, conforme Figura 3.4. e está posicionado numa zona de altitude com cerca de 122 metros (adequado para cumprir a função de observação astronómica) e com redondezas bastante arborizadas que influem o microclima do edifício. Além disso, o edifício está isolado, tendo as outras construções afastadas (a mais próxima está a 40 metros).



Figura 3.4 – Mapa de localização do Pavilhão do Círculo Meridiano do Observatório Geofísico e Astronómico da Universidade de Coimbra (edifício ao centro da zona circular amarela). Imagens retiradas do *Google Earth*

O clima dessa região de Portugal é classificado como temperado mediterrâneo com influência marítima. Os maiores índices de pluviosidade ocorrem nos meses mais frios (dezembro, janeiro e fevereiro). Chove pouco nos meses mais quentes do ano (julho, agosto e setembro).

3.6 Caracterização do edifício

O edifício do caso de estudo pode ser visto na Figura 3.5. Foram disponibilizadas as plantas arquitetónicas do edifício, assim como algumas informações sobre o seu sistema construtivo.



Figura 3.5 – Edifício do Pavilhão do Círculo Meridiano

Foram computadas as áreas e volumes do edifício, como se pode verificar no Quadro 3.1 associado às divisões do espaço da Figura 3.6 (a), (b).

Quadro 3.1 – Dados espaciais do Pavilhão do Círculo Meridiano

Ambiente	Área[m ²]	Volume[m ³]
I	98,0	509,7
II	15,3	47,5
III	16,9	52,8
IV	2,9	9,00
V	3,6	11,2
Total	136,7	630,2

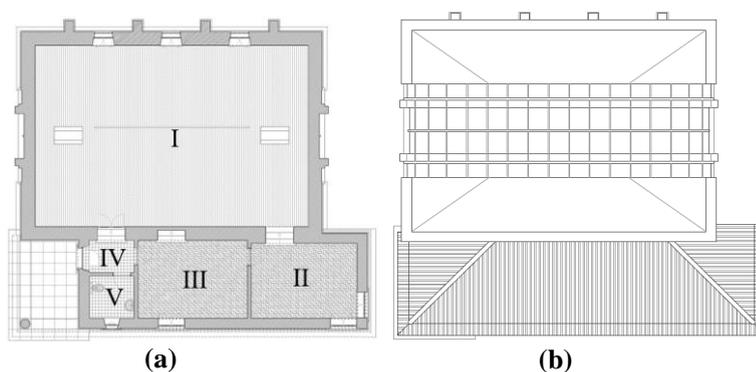


Figura 3.6 – Planta interior (a) e planta de cobertura (b)
Representações do projeto Arq. Daniel Soares (2008), escala original 1:100

O edifício possui paredes em alvenaria estrutural, com uma espessura de cerca de 62 centímetros na zona das janelas. Como a envolvente do edifício possui elevada espessura, pode-se afirmar que esta oferece elevada inércia térmica.

A planta do edifício é composta por: zona de entrada exterior com uma única porta de entrada para o edifício, um *hall* de entrada interior, uma casa de banho, 2 salas contíguas (conforme Figura 3.6). Tanto os *halls* de entrada interior quanto a última sala descrita possuem comunicação com um grande salão que se destoa dos demais pelo seu grande pé-direito, 7 metros.

A cobertura do grande salão era retrátil nos tempos em que esse local tinha a finalidade de visualizar a meridiana, de modo que se trata de uma cobertura metálica, em zinco. Essa abertura permitia que as observações da mediana fossem feitas comodamente de dentro do salão. Imediatamente abaixo da zona aberta o edifício contempla um trilho metálico que permite deslocar o círculo meridiano nas mais variadas posições no interior do salão. No entanto, essa cobertura retrátil está desativada no momento e o pé-direito fora reduzido. Não se sabe, ao certo, ainda, o preenchimento que está entre a parte exterior em zinco e esse novo forro interior. O salão principal da construção possui 3 janelas, com as dimensões: 70 x 70 centímetros em vidro simples. Este estudo será focado, sobretudo, no comportamento do salão I (Quadro 3.1).

3.7 Ensaios experimentais

O edifício do caso de estudo (Figura 3.5) envolveu um levantamento higrotérmico *in situ* por meio de sensores, juntamente a um levantamento fotográfico a fim de evidenciar as patologias presentes. Para medir os níveis higrotérmicos, foram dispostos 4 sensores, 3 deles interiores e um exterior. Na Figura 3.7, são indicadas as localizações aproximadas dos sensores de humidade e de T. O desumidificador esteve ativado durante todas as medições (exceto em algumas das situações condicionadas). Antes de este estudo ser iniciado, a direção do museu determinou essa medida uma vez que os valores de HR costumavam ser muito elevados.

Foram tomadas precauções quanto a essas posições para que fossem estratégicas para o estudo em causa. Foram, também, evitadas para tal posições muito sujeitas a influências do vento, luz solar direta (calor), fontes de calor localizadas (próximo a janelas, portas ou outros elementos que pudessem intervir de forma significativa nas medições). Os dados colhidos no sensor externo foram comparados aos valores colhidos na estação meteorológica do Instituto Geofísico da Universidade de Coimbra. O objetivo dessa comparação, foi relacionar os valores oficiais com os valores obtidos nos ensaios, para que se pudesse avaliar a afinidade entre os dados.

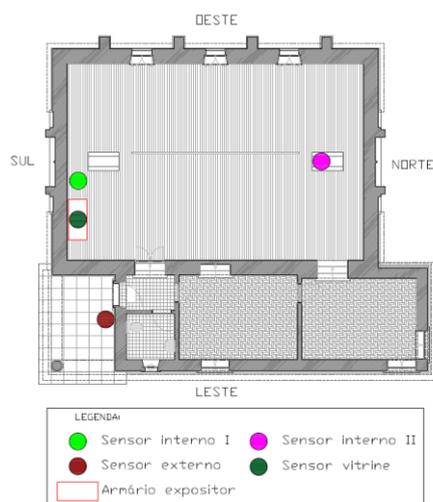


Figura 3.7 – Planta de interior com posicionamento de sensores.
Representação do projeto Arq. Daniel Soares (2008), escala original 1:100

3.7.1 Monitorização de temperatura e humidade relativa

As condições higrotérmicas, no interior do edifício, foram extraídas *in situ* por meio de sensores portáteis da marca Sensirion (Figura 3.8).



Figura 3.8 – *Smart Gadget* Sensirion, em destaque (seta vermelha) sensor. A transmissão de dados é feita via *bluetooth*. Imagem adaptada

A disposição dos sensores foi escolhida de forma a propiciar uma avaliação da discrepância de valores de temperatura e humidade relativa em diferentes zonas do museu (posição Sul, posição Sul dentro de expositor e posição Norte). Esses sensores não foram colocados todos ao mesmo tempo, mas, a partir do momento que iniciaram as medições, mantiveram-se durante o estudo sempre na mesma posição. Durante o estudo surgiram ideias para avaliar os níveis higrotérmicos em locais específicos dentro do Pavilhão, como no caso da vitrine expositora. Assim os sensores não puderam começar a recolha de dados todos ao mesmo tempo.

Houve um cuidado especial com o sensor externo (Figura 3.9 (a), (b)) que foi o único colocado com a finalidade de verificar os dados climáticos externos e, portanto, a pesquisa dependeu deste para comparação entre ambiente externo e interno. Para que houvesse maior fiabilidade

nos valores medidos, foram reduzidos os efeitos indesejáveis do vento, chuva e da radiação solar. Para isto, o sensor foi colocado numa caixinha com abertura superior e numa zona sombreada, afastada dos raios solares diretos.



Figura 3.9 – Fotografia (a) indicando a posição do sensor externo. Local coberto, protegido da radiação solar e de forma discreta. Fotografia (b), caixa a proteger o sensor externo evidenciado, reparar que está fixado com fita cola para proteção contra o vento

Foram utilizados sensores higrotérmicos modelo SHT31 da marca Sensirion. É possível escolher a regularidade que o sensor faz a leitura e armazena na sua memória interna. Nesse caso de estudo, foi determinado um intervalo de medição a cada 10 minutos, o que gerou uma ampla quantidade de medições ao longo dos meses. Contudo nem sempre os dados eram armazenados pelo sensor nesse intervalo, o que gerou a necessidade de um tratamento de dados.

Os sensores podem armazenar os dados por meses, funcionam por pilha e podem transmitir os dados das leituras via *bluetooth*. Foram considerados os valores de incertezas nominais fornecidos pelo fabricante dos sensores. Estes possuem tolerância de $\pm 2\%$ para a HR e $\pm 0,2^\circ\text{C}$ para a T. A precisão dos dados foi considerada para uma análise mais rigorosa dos resultados.

As leituras iniciaram-se ao final de janeiro de 2021 e prolongaram-se até final de maio de 2021. A colocação dos sensores, no entanto, não foram simultâneas, como dito anteriormente. Para esboçarem-se, de forma simplificada, as leituras efetuadas, elaborou-se um gráfico resumo (Figura 3.12) da cronologia de instalação dos sensores, bem como o número de leituras realizadas em cada uma das vezes que foram descarregados *in situ* os dados dos sensores.

Algumas dificuldades surgiram durante as medições. Alguns sensores colocados de início não funcionaram e tiveram de ser substituídos. Por precaução, foram extraídos dados com uma frequência mais elevada, não deixando longos períodos sem recolha. Isto para evitar possíveis lapsos na série de dados de T e de HR caso houvesse um lapso de registos por parte dos sensores.

Em cada evento de recolha de dados, foi elaborado um resumo da quantidade de leituras retirada de cada sensor e foi comentado em forma de diário, o que ocorreu no museu nos dias anteriores. Essas informações serviram de suporte para o estudo de caso. Foram utilizados *softwares* Sensirion *MyAmbience Legacy* com as versões 1.6.1 e 2.0.0 para a extração dos dados via bluetooth. O sensor colocado na vitrine expositora ficou junto das peças do acervo, possibilitando, portanto, verificar o comportamento higrotérmico desses espaços em relação ao microclima do museu e, por fim, com o ambiente externo (Figura 3.10).



Figura 3.10 – Sensor na vitrine expositora (esquerda), juntamente ao higrómetro antigo (direita) que faz parte do acervo

3.7.2 Situações condicionadas

Foram feitos testes de diversas situações que condicionam o ambiente interno. Além de tomadas precauções quanto aos efeitos que esses testes pudessem gerar na coleção do acervo, de modo que as modificações ambientais impostas foram pouco intensas. Caso contrário essas mudanças ambientais poderiam afetar a coleção, conforme enunciado no capítulo 2. A posição dos sensores é ilustrada na Figura 3.11.

Como discutido anteriormente, é relevante considerar a aclimação do acervo e também o seu microclima histórico. Uma vez que as mudanças abruptas das condições ambientais interiores podem induzir determinados processos de degradação. As leituras foram realizadas pelas manhãs em datas e horários que ficaram registados para consultas futuras no diário de leituras. Dessa forma testaram-se, em períodos conhecidos mudanças nas condições higrotérmicas, de modo que se pudessem testar as modificações que estas geravam no ambiente.

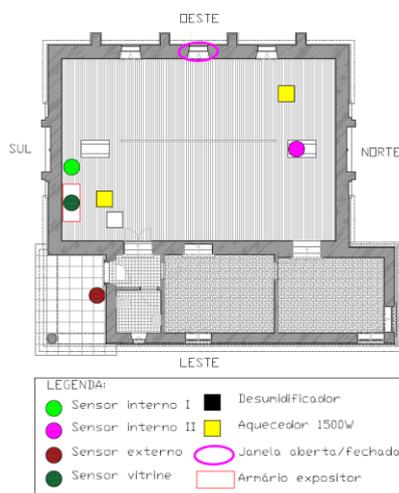


Figura 3.11 – Planta de interior com posicionamento de sensores e equipamentos utilizados para as situações condicionadas. Representação do projeto Arq. Daniel Soares (2008), escala original 1:100

Elencam-se abaixo a seguir as situações (conforme posição na Figura 3.11):

- **Aquecimento:** foram posicionados dois aquecedores a óleo, com potência de 1500 W cada. Ficaram ligados desde o dia 02/03/2021 até o dia 09/03/2021.
- **Ventilação:** de modo que se pudesse perceber a influência da ventilação, foi deixada aberta a janela central do salão. Apresenta-se, na Figura 3.11, a posição da janela utilizada para ventilação. Foram tomadas cautelas contra a intrusão e possível entrada de água ou animais. Foram instaladas duas redes de plástico com cinco por cinco milímetros, uma delas num caixilho improvisado no plano da janela e outra na face interior da grade exterior (esta já possuía uma rede metálica de cinco por cinco milímetros). Garantiu-se, assim, significativa ventilação natural do espaço. Testado do dia 09/03/2021 até o dia 16/03/2021.
- **Desumidificação:** foi posicionado um desumidificador e este foi testado do dia 16/03/2021 ao dia 23/03/2021.

	FEVEREIRO				MARÇO				ABRIL				MAIO			
INTERNO 1	2	2	2	2	2	2	3	2	4	6	4	3	3			
EXTERNO	2	2	2	2	2	2	2	3	4	7	6	3	3			
INTERNO 2					2	2	2	2	2	2	7	6	3	3		
VITRINE									2	2	5	3	3	3		
	29/01	15/02	21/02	2/03	9/03	16/03	23/03	6/04	21/04	4/05	11/05	25/05	9/06			
	DATA															

Figura 3.12 – Cronologia dos eventos de medição com as quantidades de leituras registadas no estudo de caso

3.7.3 Tratamento de dados

Os dados colhidos nas leituras, apesar de serem programados para guardarem informações em intervalos fixos, apresentam algumas singularidades que requisitaram a criação de uma macro que possibilitasse organizá-los (Anexo B). As leituras não ficaram totalmente intervaladas no período fixado e em alguns pontos falharam, de modo que a macro foi necessária de forma a corrigir, criteriosamente, os dados para uma futura apreciação dos resultados.

Isto porque, quando as leituras são colhidas, o sensor inicia o processo de coleta de dados, de modo que é necessária filtragem dessa informação. Para que seja possível comparar os dados entre os sensores, são necessários os valores de cada uma das leituras referidas a um mesmo instante. As leituras foram colhidas em instantes diferentes, de modo que os dados precisaram ser padronizados: reduzir o excesso de leituras para o valor médio nesse intervalo, possibilitar a comparação dos dados dos sensores para o mesmo instante e resolver os problemas de falha de leitura (devido ao processo de transmissão de dados). Essas três funções essenciais da macro são enunciadas, respectivamente, nos próximos parágrafos.

Os sensores somente fazem recolha de dados na frequência estipulada, ou seja, o sensor é capaz de medir o intervalo entre leituras. Contudo, esse intervalo nem sempre é exatamente o estabelecido, podendo haver ligeira margem de alguns microssegundos ou segundos. É com base na hora marcada no telemóvel, durante a recolha de dados do sensor, que ele determina o horário dos diversos intervalos de 10 em 10 minutos. Com isso determina as horas, minutos e segundos que essas leituras foram colhidas.

Quando a transmissão de dados de uma leitura num mesmo sensor é feita, temos diversos valores de temperatura e humidade para determinado intervalo de 10 minutos. Numa segunda transmissão de dados desse sensor (pressupondo que não foram deletados os dados anteriores), há novos valores de leituras e estas não coincidem, exatamente, nos mesmos segundos ou microssegundos da leitura anterior. Assim foi necessário colher os dados das leituras sobrepostas. Como foi necessário tratar dezenas de milhares de dados no Excel, tornou-se necessário criar uma macro capaz de organizar essa informação rapidamente.

A recolha de dados de temperatura e de humidade relativa é feita via *bluetooth*, com a conexão a um telemóvel e com um software para extração dos dados. Durante a recolha de dados há algumas falhas no processo de transmissão de informações, mas estas falhas não prejudicam a aquisição dos dados. Isso porque ao realizar uma nova recolha de dados são preenchidos os valores que antes não apareciam. Assim foi necessário recolher leituras sobrepostas para se preencher essas lacunas e ter uma série de dados completa.

Ao inserir uma leitura de um determinado sensor na macro, ela estabelece o mesmo intervalo entre leituras. Feito isso, para todas as leituras, obtém-se a série completa de dados. Em suma, a macro identifica em que intervalo convencional de 10 minutos se insere cada leitura e uma vez recolhidas todas as leituras desse intervalo, faz a média. Como os períodos convencionais de 10 minutos são iguais para todos os sensores, a comparação entre eles torna-se, assim, possível.

Em determinados períodos, o sensor não registou nenhum valor. Apenas inseriu uma mensagem de erro na leitura naquela hora em específico. Contudo, *à posteriori* foi interpretado como uma falha na transmissão dos dados apenas. Dessa forma percebeu-se que, numa semana seguinte, o mesmo dado, que antes aparecia como erro, dessa vez já aparecia com um valor. Assim, a macro reúne todas as leituras sobrepostas e substitui os erros pelo devido valor da leitura, ou, em outro caso, faz a média da leitura do período anterior a esses 10 minutos. Esse fato que não leva a grandes variações de resultados, pois as mudanças não costumam ser abruptas nos valores de T e HR entre períodos de poucos minutos.

Assim, duas leituras no mesmo sensor, feitas em seguida, apresentam dados ligeiramente diferentes em cada uma delas. Esses dados referem-se a instantes no tempo muito próximos entre si, mas não são exatamente os mesmos, uma vez que as leituras não podiam ser feitas ao mesmo tempo. Assim, surge a necessidade de uniformização desses dados, ou seja, Relacionar um único valor de T e HR naquele intervalo de 10 minutos. Suponhamos que, por exemplo, uma leitura do sensor esteja posicionada próxima a um determinado ponto de 10 minutos, a macro recolhe essa informação. Caso haja mais leituras nas proximidades desse ponto, a macro colhe essa informação de cada uma das leituras, realiza um ajuste com base na média desses valores e transforma-os em pontos próximos, na média de valores num único ponto (Figura 3.13).

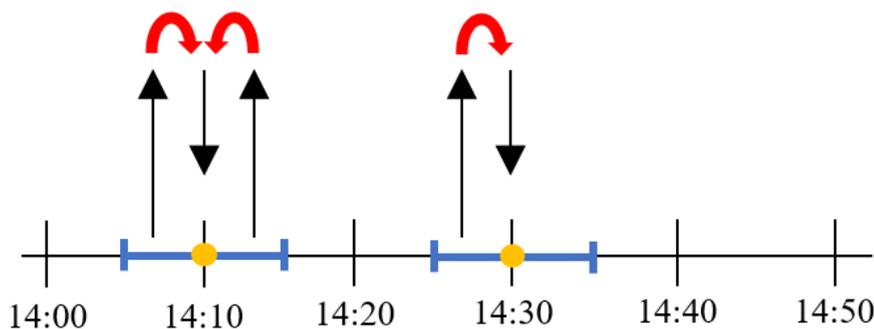


Figura 3.13 – Intervalo de defasagem em azul, das várias leituras, registadas em preto (setas ascendentes), dentro do intervalo, são calculadas seus valores médios.

A partir da Figura 3.13, verifica-se que no intervalo azul, um valor médio é apresentado como

a leitura num determinado horário (neste caso, por exemplo, a leitura das 14:10). Dessa forma, as leituras das 14:06 e das 14:14 são transformadas num valor médio que passa a ser o único valor do intervalo azul da esquerda, passando a ser apresentado no instante das 14:10. O mesmo ocorre para a representação da direita.

Inclusive, somente é possível comparar dados das leituras de um sensor externo com um sensor interno se estes dados tiverem sido colhidos a mesma hora. E como se sabe, não é possível colher todos os dados exatamente ao mesmo tempo em todos os sensores. Dessa forma, a macro serviu para adequar a posição dos dados, de modo que houvesse apenas um valor de T e HR por intervalo. Para tal, dividiu-se um ano em 52.560 intervalos de 10 minutos, e a cada um desses intervalos durante os 4 meses de estudo foram alocados um par de parâmetros psicrométricos, de modo que nenhuma das leituras pudesse estar fora desses intervalos. Dessa forma, discretizam-se os intervalos para um número finito de intervalos igualmente afastados entre si.

Então, se o leitor disparar muitas leituras sem parar (caso que ocorre quando liga o bluetooth para fazer leituras), a macro realiza a média das leituras nesse intervalo, assumindo um único valor de leitura a cada 10 minutos. O erro associado a essa formulação é baixíssimo, pois as variações de T e de HR são muito pouco significativas dentro do intervalo fixado. O erro é baixo o suficiente para assumirmos como válida essa nova disposição de dados.

Ao descarregar várias vezes as leituras de determinado sensor, reduzem-se as chances de termos falta de alguma leitura. Como as descargas são feitas em minutos distintos, pode-se ter garantia que não faltam valores (ou seja, garante-se as 144 leituras diárias). Isso porque, às vezes, o software apresenta uma falha de transmissão de dados, com leituras que aparecem sem um valor associado. Dessa forma a macro colmata as falhas e possibilita uma linha de dados no tempo, isto permite que sejam determinados os valores de T e HR que serão avaliados *a posteriori*. Assim, a macro trata os dados e possibilita fechar a série de dados para que a análise e discussão dos dados seja feita a partir destes valores.

Quando já se passaram algumas semanas e a memória do sensor está a ser cada vez mais ocupada com dados, faz-se, por precaução, um *reset* no sensor (tal é conseguido retirando a pilha e depois voltando a colocá-la). posteriormente, de maneira rápida, a pilha é repostada para não perder o valor da leitura nesse intervalo.

Dessa forma, foram tratadas todas as séries de dados colhidos pelos sensores. A partir disso, obteve-se uma série de informações definitiva (pós-tratamento) e, com base nesses valores sintetizados, passa-se para o capítulo seguinte, em que se apresenta análise dos resultados experimentais. O código da macro utilizada para o tratamento de dados pode ser observado no Anexo B.

4. RESULTADOS E ANÁLISE HIGROTÉRMICA

4.1 Enquadramento geral

Neste capítulo são expostos os dados mensais, exibidos os dados das situações condicionantes de aquecimento, ventilação e desumidificador. Todos os dados exibidos passaram pelo tratamento da macro (subcapítulo 3.7.3). Após todas essas considerações, são verificadas se as condições que o microclima esteve exposto estão adequadas, ou não, à preservação do acervo.

Os dados tratados, no caso de estudo, são mostrados por meio de gráficos que exprimem o comportamento do edifício nas diversas condições de T e HR que esteve sujeito ao longo dos meses de monitorização. Nesses gráficos exibem-se as variações e distribuições higrotérmicas, frequências das gamas de T e HR, bem como quadros com valores médios, máximos e mínimos dos parâmetros medidos.

Ao fim da análise de resultados, são comparados os valores higrotérmicos obtidos com os intervalos de referência sugeridos na bibliografia. Assim, pode-se verificar se os valores se encontram, ou não, no intervalo ideal (escolhido) para a preservação do acervo. Por fim discute-se o significado desses resultados.

Desde fevereiro em diante, havia um desumidificador ligado 24 horas por dia no interior no salão (nota: a administração do Pavilhão mantém este equipamento ligado no seu interior desde antes desta pesquisa ter sido iniciada). Isso é relevante, pois significa que os resultados apresentados nesta dissertação são influenciados por esse equipamento durante todos esses meses, exceto nos casos em que esteve desligado:

- (i) Avaria do desumidificador - 19/02/2021 a 21/02/2021;
- (ii) Teste da situação de aquecimento - 02/03/2021 a 09/03/2021;
- (iii) Teste da situação de ventilação - 09/03/2021 a 16/03/2021.

4.2 Dados mensais

Neste subcapítulo, são apresentadas e discutidas as medições higrotérmicas realizadas nos meses de fevereiro, março, abril e maio de 2021.

Primeiramente, foi verificada a fiabilidade dos valores de T e HR registada pelo sensor externo. Para tal, esses valores foram comparados com os registados na estação meteorológica do

Instituto Geofísico da Universidade de Coimbra, situado a cerca de 3 km do Pavilhão do Círculo Meridiano (Figura 4.1 (a), (b)).

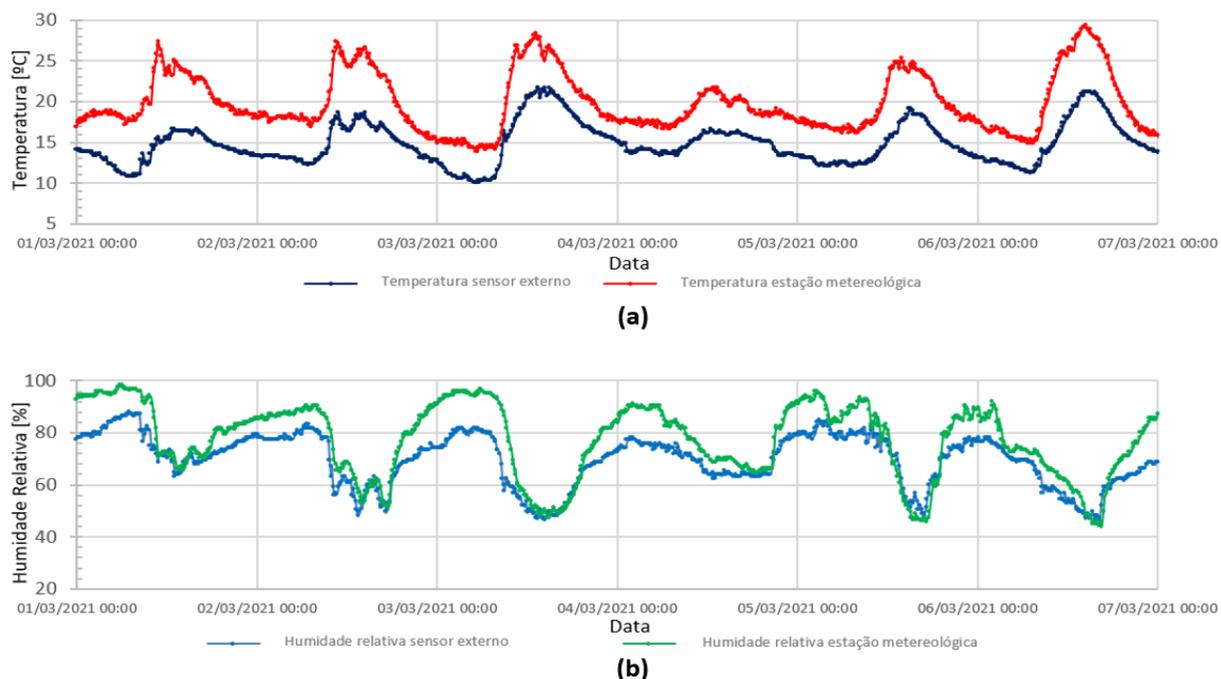


Figura 4.1 – Comparação entre os valores de temperatura (a) e de humidade relativa (b) registados pelo sensor colocado no exterior do Pavilhão do Círculo Meridiano e os registos da estação meteorológica do Instituto Geofísico da Universidade de Coimbra. Período semanal

Verificam-se diferenças nos valores medidos no sensor exterior do Pavilhão face aos valores disponibilizados pelo Instituto Geofísico (Figura 4.1 (a)). As diferenças observadas nos dois registos de temperatura podem ser explicadas pelos seguintes fatores:

- (i) Localização na malha urbana e topografia local (com eventual influência dos efeitos do fenómeno de ilha de calor);
- (ii) Influência do ambiente arborizado nas proximidades do Pavilhão;
- (iii) Diferente nível de exposição à radiação solar, com diferença nos fluxos de convecção localizada;
- (iv) Influência da caixa de proteção do sensor externo;
- (v) Diferentes alturas em relação ao solo na coleta de dados.

Na explicação do efeito desses fatores, importa destacar que o Instituto Geofísico insere-se no meio de uma densa malha urbana, enquanto o Pavilhão encontra-se na periferia. Já a zona do

Pavilhão, por estar situada numa zona bastante arborizada, é uma zona mais fresca, com temperaturas mais amenas. Nota-se que o efeito positivo ou negativo dessas perturbações não é expectável nas variações paramétricas.

Em termos de traçado, ambos os registos se assemelham. Contudo, estes não são coincidentes, pois estão transladados entre si aproximadamente 5°C. As diferenças observadas podem ocorrer pela combinação desses fatores, e não apenas devido a um fator isoladamente.

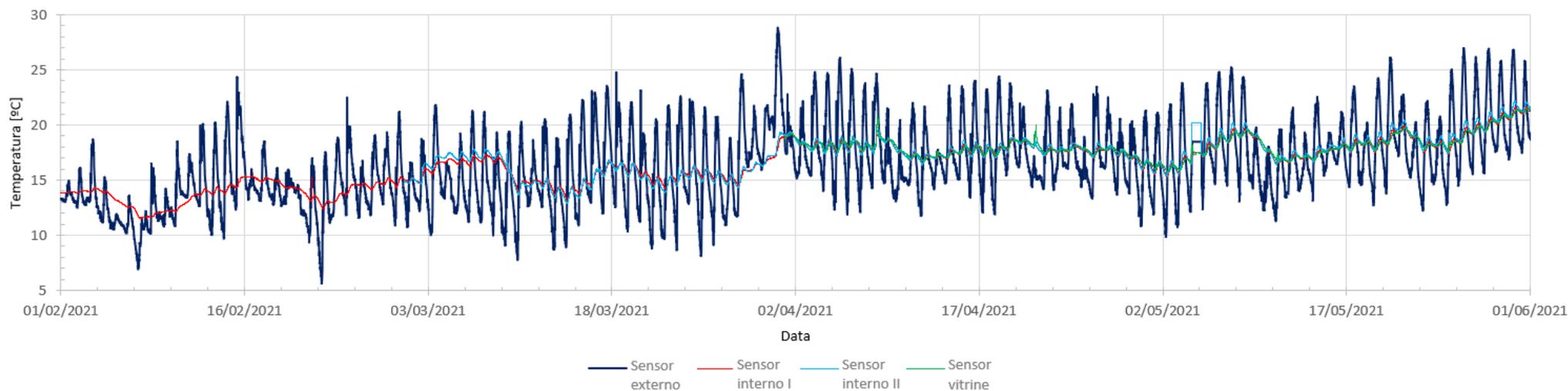
As diferenças observadas nos dois registos de HR (Figura 4.1 (b)) podem ser explicadas pelos seguintes fatores:

- (i) Condições diferentes de exposição;
- (ii) Influência da zona protegida que o sensor externo se encontra.

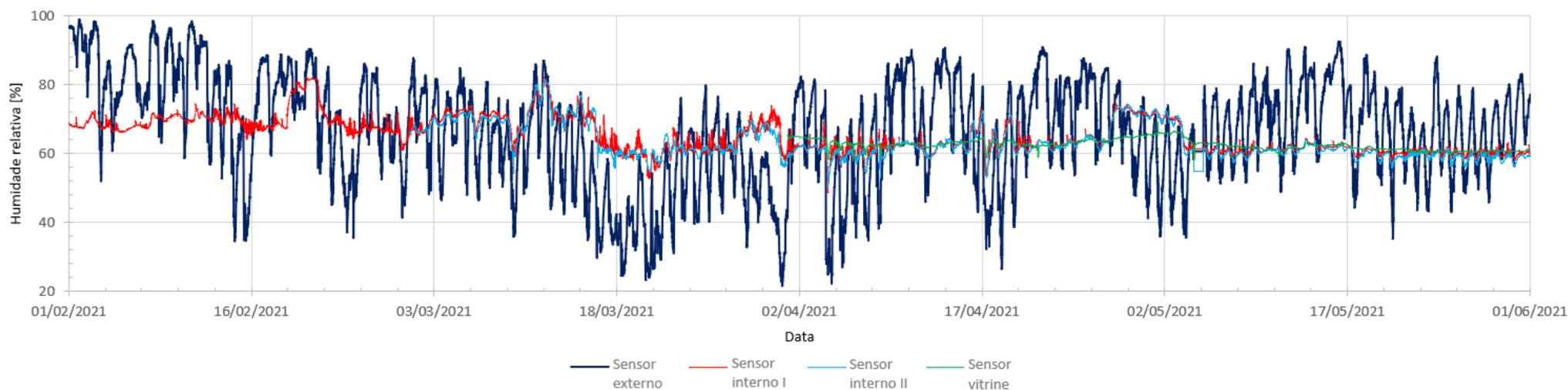
O sensor externo possui diferenças de localização, topografia, proximidade ao Rio Mondego e não está sujeito ao vento de Oeste e Norte. Em termos de traçado do gráfico, ambos os registos se assemelham nos valores mínimos de HR, no entanto, diferem-se nos valores máximos em até 10% de HR. As diferenças obtidas das temperaturas e das humidades relativas estão além dos intervalos de incerteza nominal dos sensores utilizados no Pavilhão (Figura 4.1).

As comparações entre os dados dos sensores da estação meteorológica e do sensor externo traduzem-se em algumas diferenças, contudo ambas possuem um andamento regular, com ritmos correspondentes e cadência entre si. Tanto em termos de temperatura como de humidade relativa, há uma boa concordância qualitativa entre os dois registos. Há uma afinidade e harmonia entre os registos quando comparados seus traçados. Nada indica, portanto, que o registo obtido no sensor externo do Pavilhão do Círculo Meridiano não seja fiável.

Os sensores internos foram testados antes de serem colocados no interior do museu. Foi aferido se estes apresentavam os mesmos valores de registo com base nas mesmas condições. Durante o caso de estudo, as semelhanças nos valores registados pelos sensores internos I e II (ambos sob as mesmas condições ambientais) revelam a fiabilidade dos registos (Figura 4.2 (a), (b)).



(a)



(b)

Figura 4.2 – Variação da temperatura (a) e da humidade relativa (b), medidos a cada 10 minutos ao longo dos meses de fevereiro, março, abril e maio de 2021

No Quadro 4.1, é possível comparar os valores médios, máximos e mínimos obtidos nos sensores colocados no Pavilhão. Apresentam-se, a partir desta página, sistematicamente os resultados das medições dos 4 sensores colocados no Pavilhão. Na Figura 4.3, há a dispersão de pontos de T e HR ao longo dos meses de estudo. Na Figura 4.4 e 4.5, há diagramas de caixa que mostram a distribuição estatística dos valores mensais de T e de HR. Tal distribuição foi representada por meio da formulação do dia-tipo que representa, graficamente, determinado parâmetro num determinado mês. Um dia-tipo representa num único dia do mês 24 diagramas de caixa (um diagrama por hora), os quais fornecem a distribuição, variabilidade, mediana, média, máximo e mínimo de determinado parâmetro.

Em cada um dos casos testados, faz-se uma comparação do ambiente externo e interno, pois as situações ambientais exteriores modificam-se a todo instante e influenciam o ambiente interior. Dessa forma, para se comparar o microclima em dois meses distintos, por exemplo, será necessário não somente comparar os parâmetros do ambiente interno, mas também considerar as variações exteriores. Assim, a apresentação sistemática de resultados conta sempre com os valores internos e externos.

Quadro 4.1 – Valores médios, mínimos e máximos observados para as temperaturas e humidades relativas nos sensores e na estação meteorológica

	Temperatura [°C]				Humidade Relativa [%]			
	Sensor Exterior	Sensor Interno I	Sensor Interno II	Sensor Vitrine	Sensor Exterior	Sensor Interno I	Sensor Interno II	Sensor Vitrine
MÉDIAS								
Fevereiro	13,86	13,80			75,95	69,58		
Março	15,84	15,67	15,68		56,54	66,59	65,92	
Abril	17,58	17,76	17,82	17,85	67,42	63,52	63,05	63,19
Maio	18,19	18,32	18,61	18,32	67,32	61,50	60,57	61,85
Média das médias mensais	16,37	16,39			66,81	65,30		
MÍNIMOS								
Fevereiro	5,62	11,57			34,50	61,09		
Março	7,75	13,16	12,90		21,53	52,66	54,27	
Abril	10,84	15,87	15,92	16,34	22,17	48,66	50,26	58,29
Maio	15,73	15,28	15,37	15,73	35,23	57,86	54,92	58,62
MÁXIMOS								
Fevereiro	24,28	15,36			98,84	81,88		
Março	28,84	18,96	19,34		87,73	82,02	81,62	
Abril	26,09	19,20	19,58	20,87	90,82	74,38	74,17	65,64
Maio	26,99	21,64	22,22	21,49	92,36	72,81	73,07	69,06

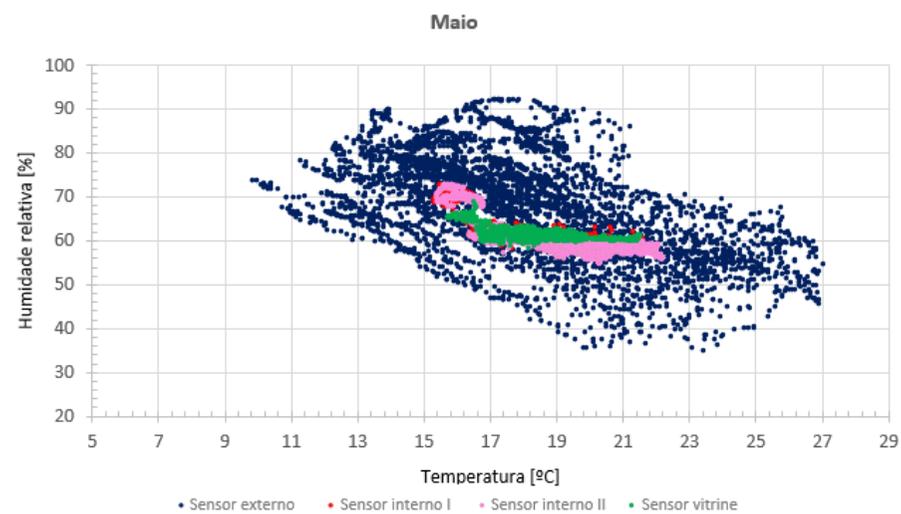
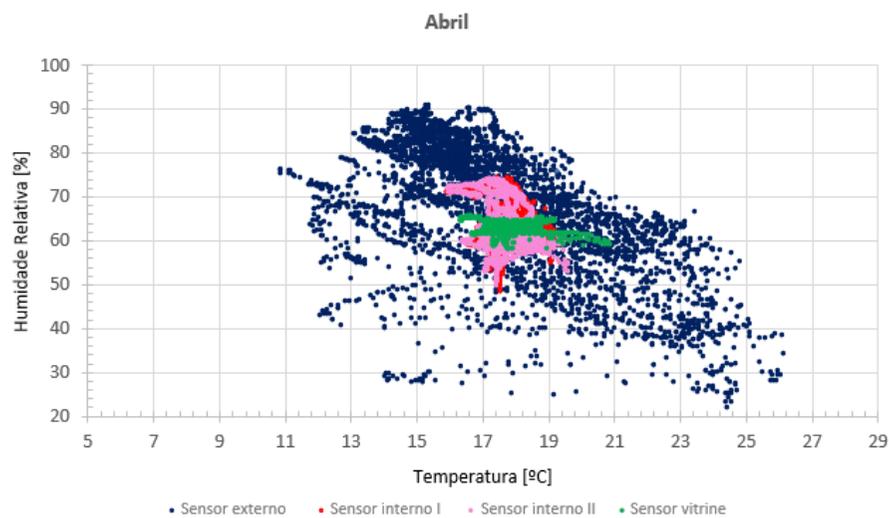
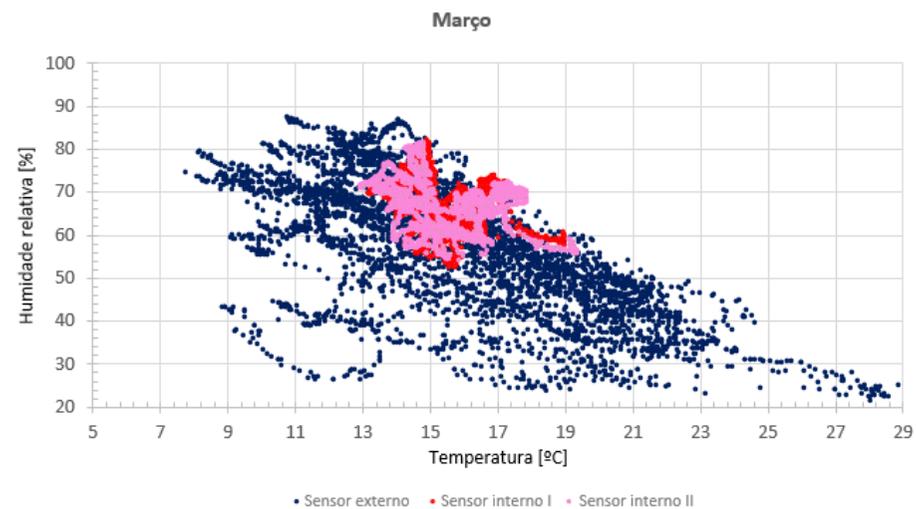
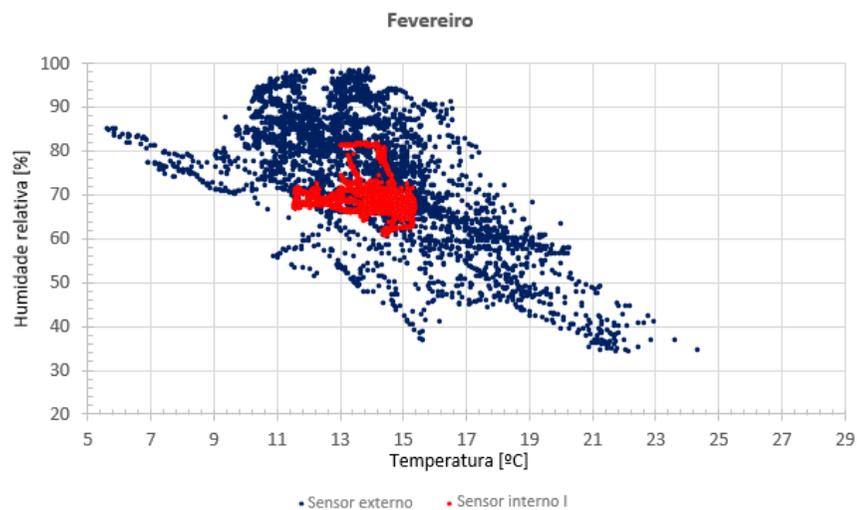


Figura 4.3 – Combinações de temperatura e de humidade relativa para todos os sensores para os meses de fevereiro, março, abril e maio de 2021. A quantidade de sensores que aparecem nos gráficos varia ao longo do tempo conforme a linha cronológica indica (Figura 3.12)

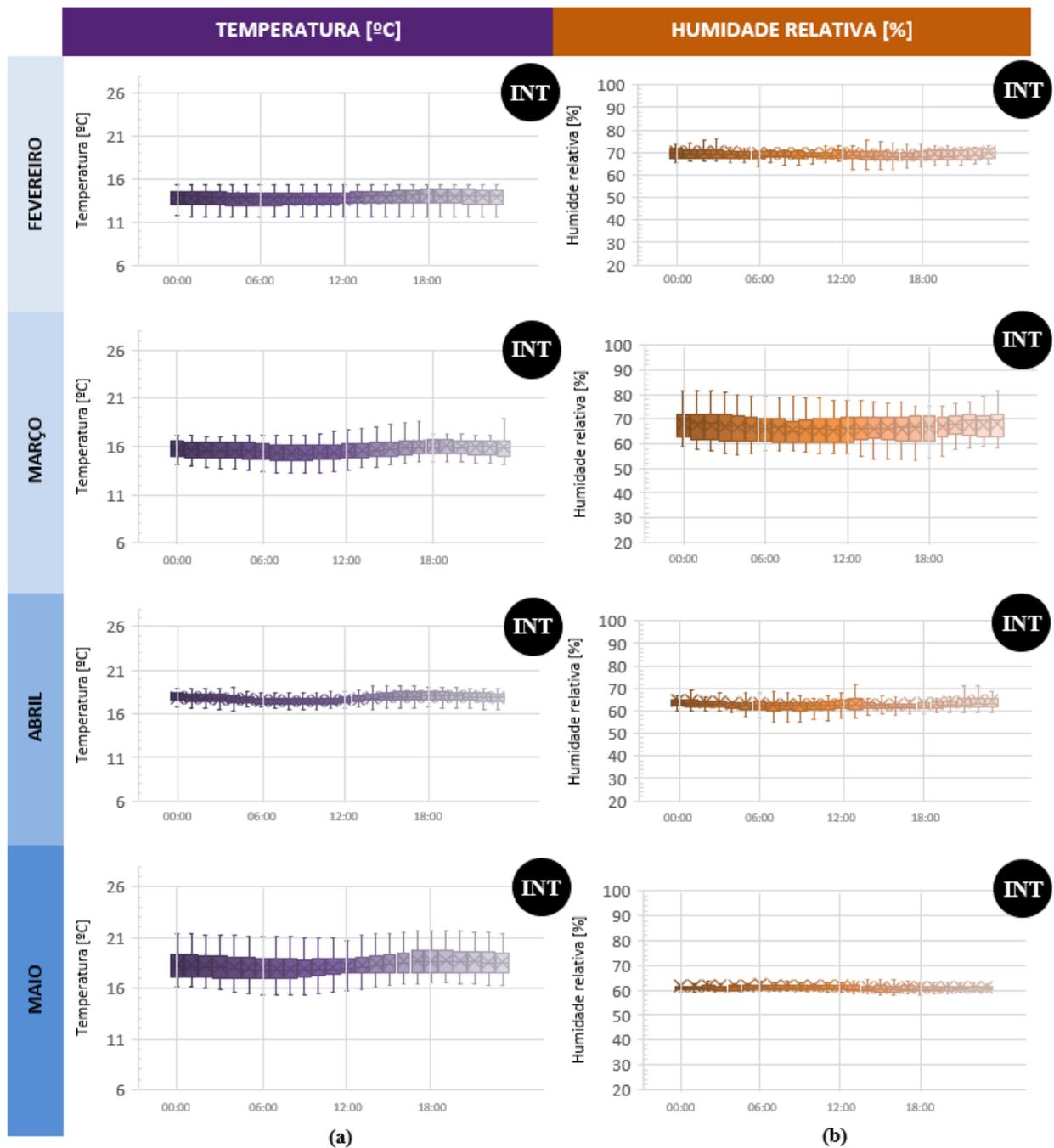


Figura 4.4 – Temperatura (a) e humidade relativa (b) registadas pelo sensor interno I (INT). Estatística mensal por meio de dia-tipo. Fevereiro a maio de 2021

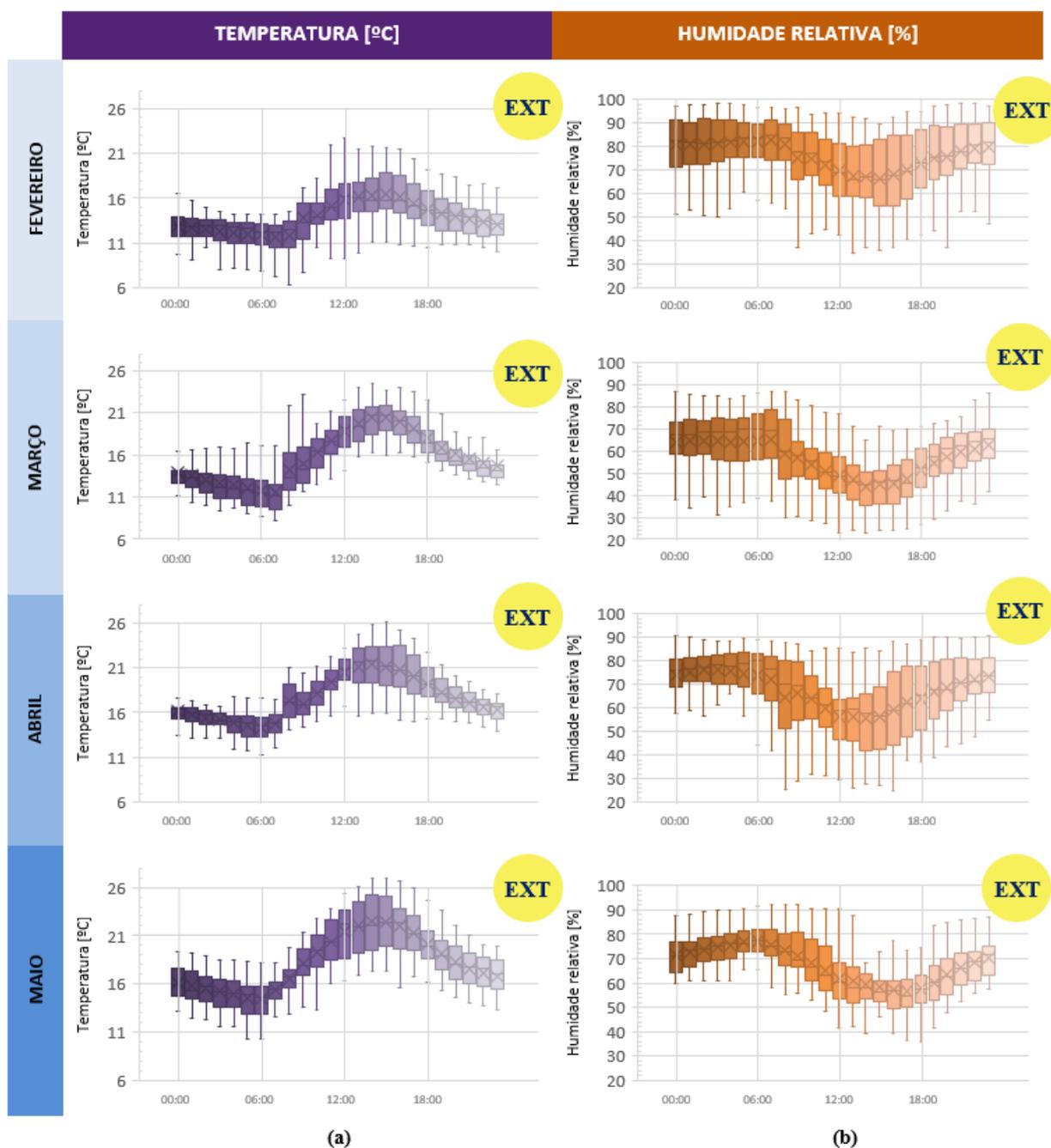


Figura 4.5 – Temperatura (a) e humidade relativa (b) registadas pelo sensor externo (EXT). Estatística mensal por meio de dia-tipo. Fevereiro a maio de 2021

De modo geral, a pesquisa foi iniciada num mês mais frio e húmido (fevereiro) e, portanto, mais propensos a elevados valores de HR associada a baixas temperaturas. Por fim, durante o mês de maio, foram verificadas temperaturas mais altas e HR mais baixa (Figura 4.2). O mês de março de 2021 não foi frio e húmido como é normalmente. Apresentou um comportamento singular, muito mais seco do que o costume, conforme o Boletim Climático de Portugal Continental (Instituto Português do Mar e da Atmosfera) com valores de HR na ordem dos 20-30% em certas ocasiões (Figura 4.2).

De modo geral, como é possível verificar na Figura 4.2, o microclima apresentou, durante os meses de estudo, valores de HR bastante elevados, em torno de 70-80% nos dias mais húmidos. Nessa mesma figura, quando são atingidas as temperaturas máximas, são também atingidas as humidades relativas mínimas uma vez que esses parâmetros são inversamente proporcionais. E, comparando-se o sensor externo com os demais sensores internos, verifica-se que o ambiente interior apresenta menor variabilidade de valores face ao ambiente exterior (Figura 4.2). A singularidade entre os valores internos pode ser mais bem representada pela Figura 4.3, uma vez que a escala da Figura 4.2 não permite uma visualização pormenorizada.

As diferenças das leituras nos sensores internos (I, II e da vitrine) apresentam uma proximidade qualitativa entre si, apesar de algumas peculiaridades. Como se pode verificar no Quadro 4.1, os valores médios são praticamente coincidentes nesses sensores. Os sensores que ficaram expostos ao salão I, ou seja, os sensores I e II, possuem diferenças mínimas entre si em comparação às suas leituras (Figura 4.3). Isso se deve ao fato de, mesmo estando separados por cerca de 8 metros entre si, estão expostos a situações ambientais muito similares. Além disso, a diferença observada nas suas leituras estão dentro do intervalo de incerteza nominal do sensor.

Contudo, não é possível afirmar o mesmo em relação ao sensor do interior do armário (da vitrine) *versus* os demais sensores do salão (interno I e interno II). É possível verificar diferenças na T e HR: quanto à dispersão dos valores e discrepância de máximos e mínimos (Figura 4.3). Devido ao material interno do armário expositor ser a madeira, e, portanto, um material higroscópico, pode-se dizer que esse material afetou os resultados. Os materiais higroscópicos variam o seu teor de humidade em decorrência da humidade presente no ar, de modo que possuem a capacidade de fixar a humidade do ar.

Esse comportamento higroscópico da vitrine de madeira pode ser observado nos resultados obtidos. É possível verificar que a HR foi confinada a um intervalo de variações mais reduzido (face aos demais sensores), uma vez que o material higroscópico se interpôs nas trocas de humidade entre o ar e o sensor da vitrine, atenuando as variações higrotérmicas e com isto possibilitando maior estabilidade microclimática.

Essa capacidade de moderar as trocas de humidade mostrou-se eficaz, sobretudo em abril (Figura 4.3). É possível perceber que, nesse mês, a vitrine apresentou valores de HR na ordem dos 60-65%, ou seja, mais baixos que nos demais sensores. Mas, como já foi dito anteriormente, não é apenas o valor em si que importa, mas também a sua variabilidade. Assim, a madeira promoveu a obtenção de uma gama de valores mais próximos entre si em termos de HR. Com isto, há uma interferência positiva no microclima da vitrine em termos da conservação.

A madeira teve impacto nesses resultados, impedindo os picos de HR e moderando as variações no período analisado. Dessa forma trata-se de um material que, em princípio, traria vantagens ao ambiente interno do Pavilhão caso discutíssemos alguma proposta de intervenção para seu interior.

Observa-se que o sensor da vitrine, apesar de ser um sensor interno, representa condições específicas da vitrine e, portanto, não é utilizado como uma referência do ambiente interior de modo geral, uma vez que está suscetível ao microclima da vitrine. Um dos objetivos para compreender o comportamento do Pavilhão é comparar como se manifestam os parâmetros higrotérmicos internos e externos num mesmo instante. Assim é necessário eleger, apenas, um sensor interno que possa servir de base para essa comparação com o exterior.

Escolheu-se o sensor interno I em detrimento do sensor interno II, pois:

- (i) O sensor interno I, (por ter iniciado as medições antes da colocação do sensor interno II) possui uma base de dados mais extensa do que o sensor interno II;
- (ii) Conforme mencionado, tanto os registos do sensor I quanto os registos do sensor II são suficientemente semelhantes.

Assim, a partir de agora, somente serão utilizados os dados do sensor interno I para representação do microclima interno em comparação aos valores exteriores (sensor exterior).

Para realizar essa caracterização mensal do comportamento higrotérmico, recorreu-se à elaboração de dias-tipo (Figuras 4.4 e 4.5 (a), (b)), por meio dos quais foram analisados os registos dos 4 meses. Um dia-tipo indica o comportamento de um dia genérico do mês, mas que possibilita conhecer o comportamento de todos os dias desse mesmo mês. Baseado nos registos obtidos em cada mês, os quais conferiram um vasto espaço amostral, (cada mês com cerca de 4320 intervalos de 10 minutos no caso do mês ter 30 dias, por exemplo), podem-se elaborar vários gráficos estatísticos.

Observa-se que esses gráficos condensam uma grande quantidade de informações para serem capazes de exprimir um mês em, apenas, um dia. Cada dia-tipo mostra o comportamento de

todo o mês em termos de variações de HR e T. Assim, em vez de 31 gráficos que representem a temperatura diária no mês de maio, basta considerar 1 gráfico de dia-tipo, pois este já é capaz de expressar as variâncias e o comportamento da amostra nesse mês.

Os gráficos de dia-tipo exibem de hora em hora os diagramas de caixa que representam as variações de um parâmetro (T ou HR) em cada uma das horas do mês. Assim, o dia-tipo da temperatura em abril, por exemplo, possui 24 diagramas de caixa, cada um destes diagramas referindo-se a uma determinada hora do dia.

Exemplo ainda para o mês de abril: Às 06:00 do dia 1 de abril $T=15^{\circ}\text{C}$, às 06:00 do dia 2 de abril $T=13^{\circ}\text{C}$, às 06:00 do dia 3 de abril $T=12^{\circ}\text{C}$ e assim sucessivamente. O diagrama de caixa das 06:00 mostra, no gráfico de dia-tipo de T em abril, o valor mínimo, o valor máximo, o quartil 50%, a média e a mediana de todos os valores de temperatura colhidos às 06:00 em cada um dos 30 dias de abril. Nota-se que os gráficos de dia-tipo foram feitos apenas para horas inteiras, exemplo: 6:00. Assim, os valores das 06:10, 06:20, 06:30, 06:40 e 06:50 (exemplo de horas quebradas) foram desprezados em todos os dias do mês. Assim, os valores medidos à 00:00, 01:00, 02:00, (...), 23:00 de cada um dos 30 dias de abril, já constituem dados suficientes para a elaboração do gráfico de dia-tipo. Assim, ao desprezar os valores de um parâmetro em horas quebradas, são considerados 720 registos (24 horas x 30 dias do mês de abril), em vez de 4320 registos (6 registos por hora x 24 horas x 30 dias do mês de abril). Justificativa desse método:

- (i) Os parâmetros costumam modificar-se pouco de um intervalo de 10 minutos para o seguinte, de modo que utilizar, apenas, um intervalo a cada 6 intervalos não prejudica a formulação dos dias-tipo;
- (ii) É suficiente analisar 720 registos mensais, pois estes já oferecem um espaço amostral suficiente para caracterizar a amostra.

Com base na comparação dos gráficos de dia-tipo, pode-se obter muitas conclusões. Ao contrapor os gráficos da Figura 4.4 (a) com a Figura 4.5 (a), pode-se, nessa comparação, distinguir as temperaturas externas e internas sobretudo por:

- (i) Terem uma tendência diferente entre si, a temperatura exterior se reduz durante a madrugada e aumenta pouco a pouco durante o dia até por volta das 16 horas e volta a arrefecer até o final do dia. Já a temperatura interior apresenta uma constância, tanto em termos de valores mínimos, quanto médios ou máximos. Mal se verifica uma mudança de temperatura interna de hora em hora;

- (ii) A dimensão do quartil 50% mostra que a variabilidade de valores de hora em hora no interior é muito menor do que no exterior e apresentam-se numa faixa de valores muito semelhante durante todo o mês.
- (iii) Enquanto o ambiente externo apresenta modificações elevadas diárias em termos de temperatura, o interior se contrapõe a esse comportamento, mostrando uma grande estabilidade térmica.

Portanto, o interior do Pavilhão apresenta um comportamento visivelmente distinto do que ocorre no exterior. Sendo uma construção robusta, com paredes em alvenaria de pedra e com cerca de 62 centímetros de espessura, tais características conferem elevada inércia térmica ao edifício.

Em termos de humidade relativa, os gráficos mensais interiores e exteriores (Figura 4.4 (b) e Figura 4.5 (b)) apresentam:

- (i) Uma tendência parecida entre si, com bastante estabilidade de valores de humidade relativa. No mês de março, há modificações de padrões face aos outros meses. Nesse mês a diferença entre valores mínimos e máximos é maior, assim como a dimensão do intervalo do quartil 50%. Sendo, justamente, este o em que foram testadas as situações condicionadas. Conclui-se que tal diferença de comportamento se deve às várias imposições que o microclima esteve sujeito;
- (ii) Os registos internos têm constância entre si, no entanto, como expectável, os valores médios de HR são maiores em fevereiro e reduzem-se, gradativamente, até maio (apesar das perturbações geradas nas situações condicionadas terem aumentado a amplitude dos valores de março, modificando um pouco o efeito gradativo citado anteriormente);
- (iii) Entre os registos externos, há uma harmonia nas transições de hora em hora, exceto entre as 07:00 e 08:00. Por volta dessas horas há mudança das condições de HR mais intensa do que nas demais horas em todos os dias-tipo elaborados;
- (iv) Os registos externos apresentam quartis 50% extensos e nota-se que, apesar de terem muitas semelhanças entre si, o mês de março apresenta humidades relativas mínimas e médias bem abaixo dos valores de fevereiro, confirmando a informação do Boletim Climático de Portugal Continental de um mês de março muito seco. Mesmo durante a madrugada, quando houve tendência de a humidade relativa subir, foram registados valores mínimos, na ordem dos 30-35%.

Ao comparar os gráficos da Figura 4.4 (b) com a Figura 4.5 (b), nota-se uma distinção nos registos de humidade relativa externos e internos, em termos de:

- (i) Tendências diferentes, enquanto os sensores externos apresentam grandes variações de HR, os intervalos de variações no interior são muito menores, estando em todo mês praticamente contido numa faixa de 10% de HR;
- (ii) A transição entre as 07:00 e 08:00, que evidenciava uma mudança mais abrupta de valores não se manifesta no interior;
- (iii) Há elevada estabilidade de HR no interior em todos os dias-tipo, diferentemente dos valores exteriores;
- (iv) Os quartis 50% reduzem-se no interior e no exterior no mês de maio, influenciado pelas temperaturas mais altas do clima. Há menores valores médios de humidade relativa no mês de maio (externo), em relação aos meses anteriores. Assim, o microclima, no mês de maio, é afetado, reduzindo os valores mínimos, médios e máximos a um patamar praticamente constante de 60% de HR.

A partir dos vários fatores supracitados, é possível concluir que o Pavilhão apresenta valores estáveis de humidade relativa. Assim, a partir da análise da forma, frequência e a amplitude que os parâmetros variam no tempo, conclui-se que, de modo geral, as variações climáticas exteriores se manifestam no interior de modo mais ameno, uma vez que o edifício atenua as variações microclimáticas. Tal comportamento é visível nos gráficos das Figuras 4.4 e 4.5, e levam à conclusão de que, em termos globais, o edifício, por possuir significativa inércia térmica, ausência de fontes permanentes de vapor e baixa ocupação, possibilita uma extraordinária estabilidade microclimática.

O episódio da avaria do desumidificador possibilitou compreender, basicamente, o que ocorre no microclima quando não há intervenção no microclima. No dia 21/2, notou-se, ao realizar a recolha de dados, que o desumidificador estava desligado. Após isto, foi religado, e foi feita a extração das leituras (Figura 4.6).

Não foram encontradas mudanças de HR exteriores capazes de justificar essa alteração repentina no microclima. Foi possível detetar o dia e a hora aproximada que o desumidificador parou de funcionar, pois há uma notável mudança nos valores de HR (Figura 4.6). A subida da HR foi cerca de 10% acima do valor médio anterior encontrado quando este estava a funcionar.

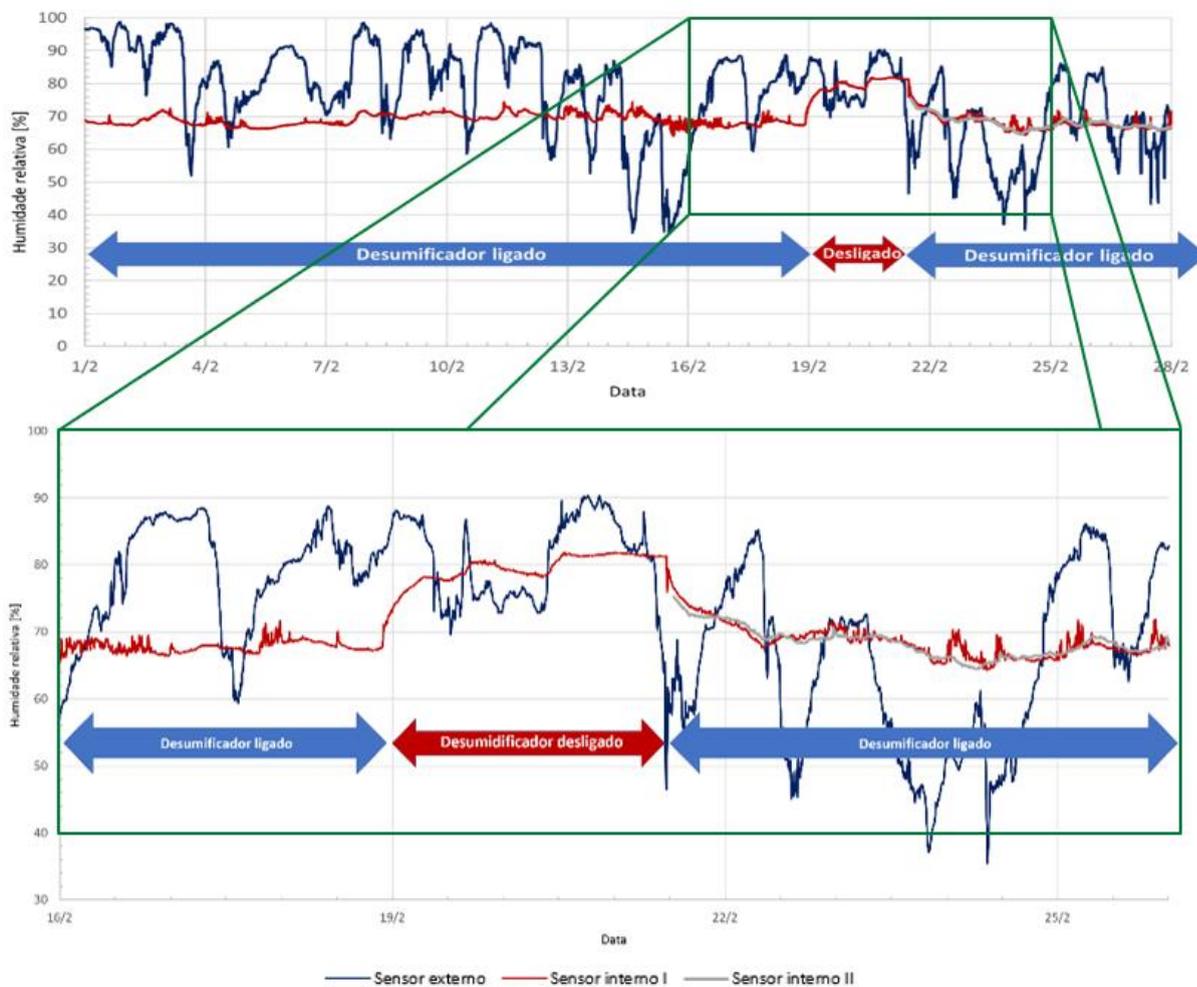


Figura 4.6 – Variação da humidade relativa em fevereiro de 2021. Com indicação do período de avaria.

4.3 Situações condicionadas

Durante o mês de março, foram impostas modificações no microclima: aquecimento, ventilação e desumidificador (Figura 4.7). Os resultados experimentais, baseados nos registros dos sensores higrotérmicos, foram tratados e foi realizado um estudo estatístico baseado nos dia-tipo de cada uma das semanas nas quais foram feitas intervenções no microclima (Figura 4.8). Foram elaborados gráficos, os quais seguiram uma metodologia semelhante àquela empregue nos gráficos mensais do subcapítulo anterior. Conforme justificado anteriormente, a semelhança dos valores nos sensores internos conduz à utilização, apenas, dos valores do sensor interno I, desconsiderando o sensor interno II para efeito de comparação com o exterior.

Desde o dia 02/03/2021 até ao dia 23/03/2021, num mês classificado como quente e muito seco para aquela época do ano, foram testadas, durante cada semana, diferentes modalidades de gestão do microclima, por meio de situações condicionadas. Estas geraram ligeiras modificações no ambiente interno, de modo que não promovessem quaisquer efeitos colaterais sobre a coleção, mas que pudessem induzir o microclima a um cenário mais propício à coleção. Não era expectável antes de terem sido iniciados os testes que o mês de março teria características nada habituais. Esse fato reflete-se nos valores coletados neste estudo.

A seguir são expostos, sistematicamente, todos os gráficos de dias-tipo elaborados ao longo deste estudo e em seguida são analisados e discutidos (Figura 4.8 e 4.9). Esse dia-tipo representa: os valores obtidos hora a hora em cada um dos 7 dias de medições condensados num único gráfico. Os gráficos possuem os mesmos máximos e mínimos na escala, o que os tornam comparáveis entre si, além da escala possibilitar uma comparação com os gráficos mensais realizados no capítulo anterior.



Figura 4.7 – Imposições semanais ao microclima, aquecedor (a) de 1500 W (o segundo aquecedor não está representado), ventilação natural por meio de janela com tela protetora (b) e desumidificador (c)

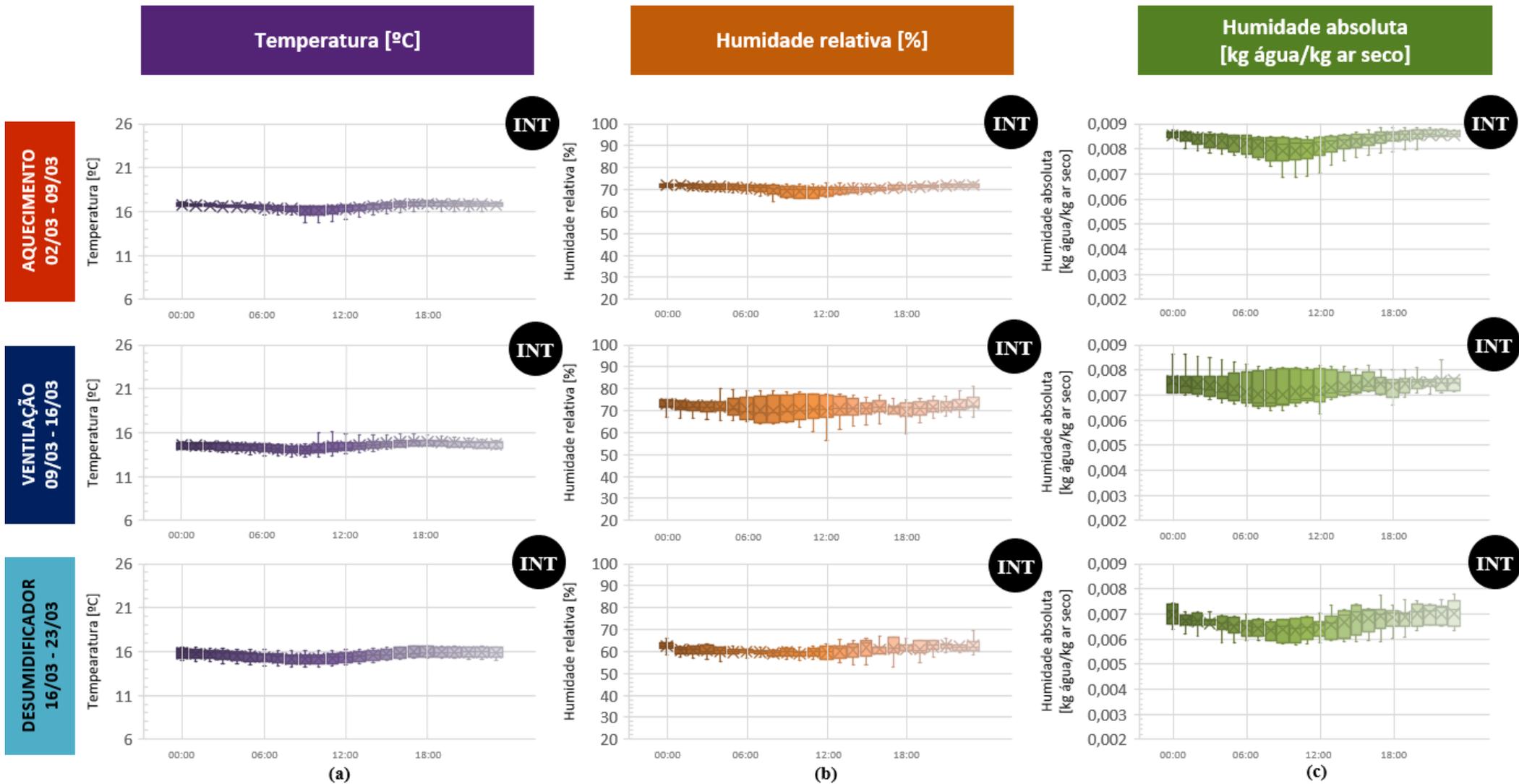


Figura 4.8 – Estatística semanal por meio de dia-tipo das situações impostas. Temperatura (a), humidade relativa (b) e humidade absoluta (c) baseados nos registos do sensor interno I (INT). Semanas de 02/03 a 23/03

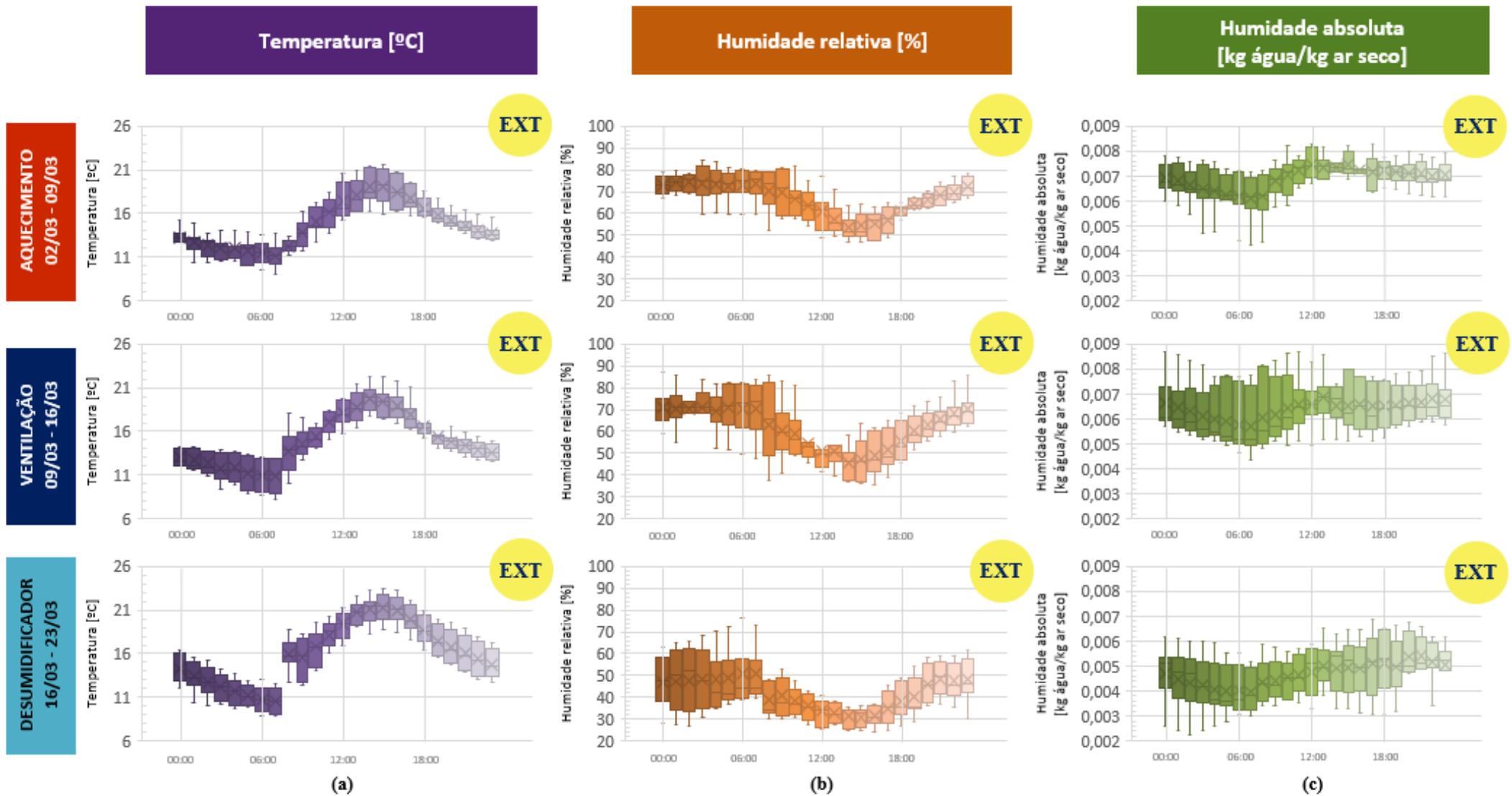


Figura 4.9 – Estatística semanal por meio de dia-tipo das situações impostas. Temperatura (a), humidade relativa (b) e humidade absoluta (c) baseados nos registos do sensor externo (EXT). Semanas de 02/03 a 23/03

De modo geral, há diferença de comportamentos significativos entre os valores interiores e exteriores. Nos 18 gráficos elaborados, são feitas comparações entre o interior e exterior dos gráficos de: temperatura, humidade relativa, humidade absoluta. A seguir são feitas comparações entre os gráficos interiores entre si e vice-versa com os gráficos exteriores. Por fim são comparadas, nos próximos subcapítulos, as situações impostas entre si.

Ao comparar os gráficos da Figura 4.8 com a Figura 4.9, pode-se concluir que:

- (i) As variações diárias de T e de HR são maiores no ambiente externo do que no interior do museu;
- (ii) No interior, as variabilidades horárias apresentam-se muito mais amenas, com valores mínimos, médios e máximos muito mais próximos entre si.

Em termos dos gráficos interiores entre si, pode-se dizer que:

- (i) A temperatura foi maior, como se era de esperar, na situação de aquecimento, apesar que em apenas 1°C acima da temperatura média da situação de desumidificação. A ventilação, ao promover maiores trocas de calor com o exterior gerou as temperaturas mais baixas dentre os três casos;
- (ii) A humidade relativa apresentou-se menos controlada durante a ventilação, mais suscetível ao clima exterior do que os outros casos. Cada hora do dia-tipo apresenta extremos mais afastados e maior variabilidade de valores entre si com a ventilação. Enquanto o aquecimento e o desumidificador propiciam uma maior constância de valores. No aquecimento há maior estabilidade dos valores médios de humidade relativa, os quais atingem patamares de 70%. Enquanto o desumidificador mantém valores de humidade relativa estáveis e a níveis médios de 60%;
- (iii) Já para a humidade absoluta, apresentaram, respetivamente, maior humidade absoluta o aquecimento, ventilação e desumidificador, apesar de que os 3 apresentam variabilidades com alguma semelhança entre si. A diferença mais substancial refere-se ao fato de que, apenas na situação de desumidificador, os valores de humidade são baixos numa faixa de 0,006 a 0,007 kg água/kg ar seco.

Entre os gráficos exteriores, verifica-se que:

- (i) Há ciclos diários de aquecimento e arrefecimento. Durante às 08:00, ocorre uma variação que se destoa do resto do comportamento diário. Conforme a semana apresenta maiores temperaturas maiores são as diferenças no padrão. No nascer do sol, os raios solares incidem diretamente sobre a caixa, o que gera um aquecimento

e, assim, um contraste térmico com o início sombreado da manhã. Isto faz disparar a variação e gera uma modificação no padrão;

- (ii) Em termos de HR, o comportamento exterior foi diferente nas três semanas estudadas, com bastantes menos variabilidades de HR durante o estudo da 1ª situação condicionada. Durante a 2ª situação condicionada, temos amplitudes superiores a 1ª, e nota-se uma redução de HR durante o dia. Durante a 3ª semana, justamente quando o desumidificador esteve ligado ao interior, o ambiente exterior apresentou valores de HR inferiores aos observados nas semanas anteriores, com valores médios durante o dia a rondar os 30%;
- (iii) Uma mesma tendência pode ser verificada com os valores de HA. Uma 1ª semana com menos variabilidades, porém estagnados num valor mais elevado de HA. Numa 2ª semana, maiores variabilidades, com valores médios inferiores à situação anterior. Durante a 3ª semana, destoaram-se os valores absolutos em relação aos outros casos, uma vez que apresentou-se um ambiente muito mais seco que nas outras semanas.

Dos casos estudados, na última semana do mês, o clima propiciou os valores mais baixos de HR e HA mensal no sensor externo. Isso contribuiu para uma redução da HR e HA no interior. Aliado ao desumidificador no interior, o exterior propiciou uma redução de humidade ainda maior no interior.

4.3.1 Aquecimento

Foram dispostos dois aquecedores de 1500 watts conforme Figura 3.11. A distância dos aquecedores em relação às peças foi considerável; é necessário realizar um controlo de temperatura de modo que os aquecedores não estejam muito próximos dos objetos para minimizar os efeitos da radiação (Thomson, 1986). Durante esse período, foi desligado o desumidificador.

Resultou numa elevação de temperatura para níveis superiores aos outros casos. Em termos de HR, apresentaram-se valores médios muito parecidos entre si ao longo do dia e com pouca variabilidade, o que significa que a HR ficou mais estabilizada em comparação ao caso da ventilação, por exemplo. A humidade absoluta apresentou valores maiores do que nas outras situações impostas (Figuras 4.8 e 4.9 (a), (b), (c), (d)).

De modo geral, ainda que a semana de aquecimento tenha tido menores variabilidades de humidade relativa exteriores, a solução de aquecimento no interior mostrou-se interessante de modo parcial, dada a estabilidade de valores de HR e HA gerados. Contudo, em termos globais não apresenta nessa estabilidade valores uma gama adequada de HR. A situação de aquecimento em comparação com a situação de desumidificação, possibilitou maior estabilidade, apesar da gama de humidade relativa mais elevada.

4.3.2 Ventilação

Uma das janelas do museu foi deixada, continuamente aberta, durante a semana de teste. Como o mês de março foi considerado um mês muito seco, ao permitir a ventilação, acabou-se por reduzir a humidade absoluta interior em níveis médios inferiores *versus* a situação de aquecimento. Sendo a determinação da humidade absoluta fundamental para a decisão se é desejável, ou não, ventilar. Durante esse período, foi desligado o desumidificador.

Em termos de humidade relativa, a ventilação propiciou maior amplitude de valores em comparação às as situações de aquecimento e de desumidificação. No entanto, na ventilação os valores máximos se aproximam muito dos 80% de humidade relativa, um valor considerado muito elevado (Figuras 4.8 e 4.9 (a), (b), (c), (d)).

4.3.3 Desumidificador

O desumidificador controlou melhor do que a ventilação a variabilidade de humidade relativa. Propiciou valores de HR próximos aos 60%. Enquanto a situação de aquecimento, apesar de também ter estabilizado a variabilidade, apresentou valores na ordem dos 70%. Observa-se que a estabilidade da humidade relativa é uma prioridade, devendo-se evitar oscilações superiores a 10% em 24 horas (Alarcão, 2007).

Durante a semana em que o desumidificador esteve ligado, atingiram-se os valores mínimos de humidade relativa exterior. Esse mês muito seco e em particular essa semana, juntamente ao aparelho a funcionar no interior, influenciaram os valores de humidade absoluta interior, reduzindo-os face às outras situações condicionadas (Figura 4.8 e 4.9 (a), (b), (c), (d)).

Ao compararem-se as 3 situações impostas, verifica-se que seria interessante conjugar os efeitos benéficos do aquecimento e do desumidificador. A vantagem da redução das amplitudes de variações (estabilidade) de HR e HA, durante o aquecimento, aliada aos valores mais baixos de HR e HA com o desumidificador, é uma solução a ser considerada. Em estudos futuros, podem ser feitos testes com o aquecimento e o desumidificador ligados ao mesmo tempo no interior do Pavilhão.

4.4 Avaliação da adequabilidade ao acervo

A avaliação do acervo é feita com base nos materiais que o compõem. Esses materiais requerem condições específicas e de alguma complexidade de conciliação num mesmo ambiente. No Quadro 4.2, são definidas algumas gamas de valores de referência típicos para os tipos de materiais encontrados na coleção museológica do Pavilhão do Círculo Meridiano.

Quadro 4.2 – Principais elementos constituintes da coleção museológica do Pavilhão do Círculo. Consoante valores de Ferreira (2008). Zona adequada: $35\% \geq HR \leq 60\%$ e $20^{\circ}\text{C} \geq T \leq 25^{\circ}\text{C}$

Classe	T [°C]	HR [%]
Bronze	15-25	0-60
Madeira	15-25	35-65
Metais, ligas, latão, prata, chumbo, cobre e liga de estanho	20-25	0-65

A seguir são comparados os valores obtidos nas medições referentes aos 4 meses de estudo com os valores de referência (Figura 4.10). Cada ponto esboçado no gráfico se refere a uma leitura de temperatura e humidade relativa feita num intervalo de 10 minutos.

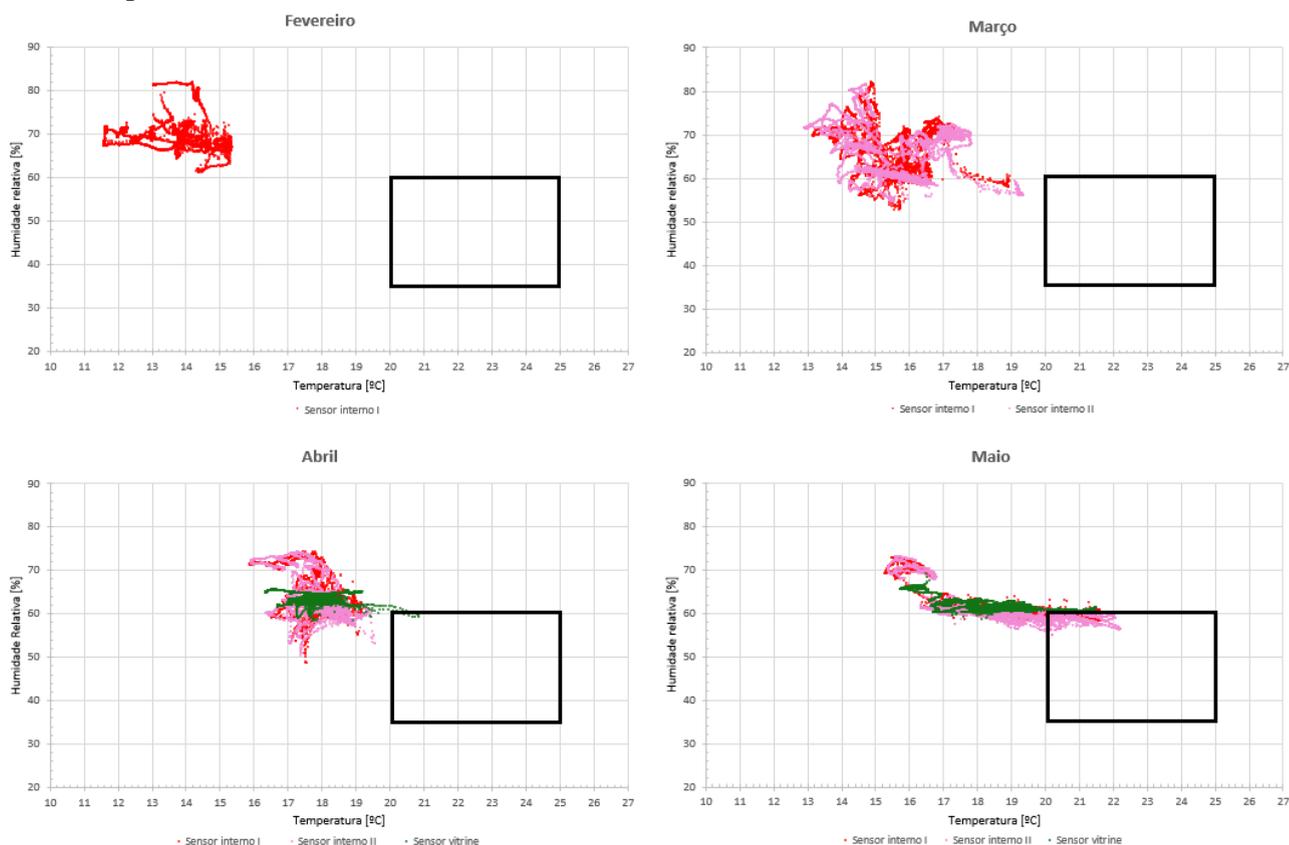


Figura 4.10 – Zona de referência em função dos materiais constituintes da coleção sobrepostos aos valores medidos nos sensores durante fevereiro, março, abril e maio. Baseada nos valores de Ferreira (2008)

Como verificado nas Figuras 4.10, os valores de temperatura e humidade relativa apresentaram-se na maior parte das medições contidos numa faixa de valores muito acima do desejável. A seguir são ponderadas as ações a serem tomadas face a esses resultados.

A presença do bronze limita o máximo desejável da HR para os 60%, mesmo que a madeira apresente, segundo essa tabela, um máximo desejável de 65%. O contrário ocorre com os mínimos, sendo o valor da madeira o condicionante. Fato necessário de conjugar, pois o acervo possui muitas peças de madeira e metal, que são inseparáveis.

Não é suficiente dizer que estar fora dos valores de referência implica uma necessidade de mudança do microclima conforme explicado no subcapítulo 2.7., apesar da distância dos resultados em relação à referência dar sinais de que é necessário controlar o microclima. O estudo pormenorizado do estado de degradação é imprescindível para certificar a necessidade de uma intervenção. São necessários mais estudos de outros profissionais para formular a estratégia mais adequada a tomar.

A escolha de modificar, definitivamente, o microclima envolve, também, uma rigorosa análise de risco, inerente nesse tipo de situação. O desafio de modificá-lo muito lentamente, de modo a reacondicionar as peças ao longo desse período de nova adaptação, também é de toda importância.

Assim, caso os outros estudos confirmassem a adequabilidade da intervenção e a validade dessa faixa higrotérmica para essa coleção, deveria-se proporcionar uma redução da humidade relativa interior e aumento da temperatura, sobretudo nos meses mais frios do ano. No resto do ano, já seria possível moderar a intervenção ao microclima, principalmente nas estações mais secas e quentes do ano, as quais não foram abrangidas neste estudo.

A partir do momento que se intervém no microclima com soluções ativas, há a necessidade de garantir que estas estejam em constante funcionamento, com sensores capazes de aferir se o ambiente está a arrefecer demasiado, ou humidificar-se. Em caso de falha do sistema, não se pode deixar muitas horas sem funcionar, uma vez que o acervo já está reacondicionado a esse novo microclima. Sem o sistema ativo funcionando estaria-se forçando o acervo a se reacondicionar novamente a novas condições e isso pode danificar o acervo. Assim é necessário que a manutenção seja constante e o sistema fiável, caso contrário o microclima artificial torna-se um risco à preservação do acervo.

Outros estudos complementares poderiam inserir a componente do controlo da luz, medir a influência direta das visitas, avaliar os ataques microbiológicos, analisar a qualidade do ar, a avaliação do estado de degradação dos objetos feitos por peritos, entre outros. Dessa forma,

poder-se-ia classificar o nível das deteriorações e isto teria grande impacto na decisão da adequabilidade do microclima do espaço museológico. Isso porque o estado de conservação dos materiais servirá de base para escolha das modificações nas condições higrotérmicas.

Nos gráficos mensais, mesmo com o desumidificador ligado, em fevereiro (mês frio e húmido), por exemplo, um nível médio de 70% de humidade relativa é atingido. E, somente em maio (mês quente e mais seco), são atingidos valores médios de 60%, os quais ainda assim são valores considerados elevados (além do intervalo de referência).

Ainda que a solução de desumidificar tenha tido resultados interessantes no controlo e estabilidade de humidade relativa e o aquecimento uma estabilidade de temperatura, deve-se considerar a solução da utilização de ambos simultaneamente. Apesar de que o desumidificador ligado não foi capaz de garantir níveis adequados em fevereiro. E, se foram atingidos valores de humidade relativa tão elevados nesse mês, mesmo com o equipamento ligado, conclui-se que, caso estivesse desligado, valores de 80% de humidade relativa poderiam ser facilmente atingidos nessas circunstâncias. O caso da avaria evidenciou a influência do desumidificador em atenuar os valores de humidade.

Seria muito vantajoso encontrar uma solução passiva também, pelo menos para harmonizar parcialmente o microclima. Assim, em caso de falhas nos equipamentos de climatização, amplitudes menores de variações nos parâmetros poderiam oferecer menor risco à coleção e reduzir a dependência dos sistemas ativos.

Outra análise realizada sobre os resultados refere-se à contabilização, mensalmente, da quantidade de vezes que determinado valor inteiro de leitura (Temperatura e humidade relativa) se sucedia em relação ao número total de leituras no mês. Este estudo foi realizado com base no conceito de frequência e frequência acumulada (Figura 4.11). Nesses gráficos fez-se uma sobreposição do intervalo de referência para clarificar a quantidade de leituras que estiveram fora desses.

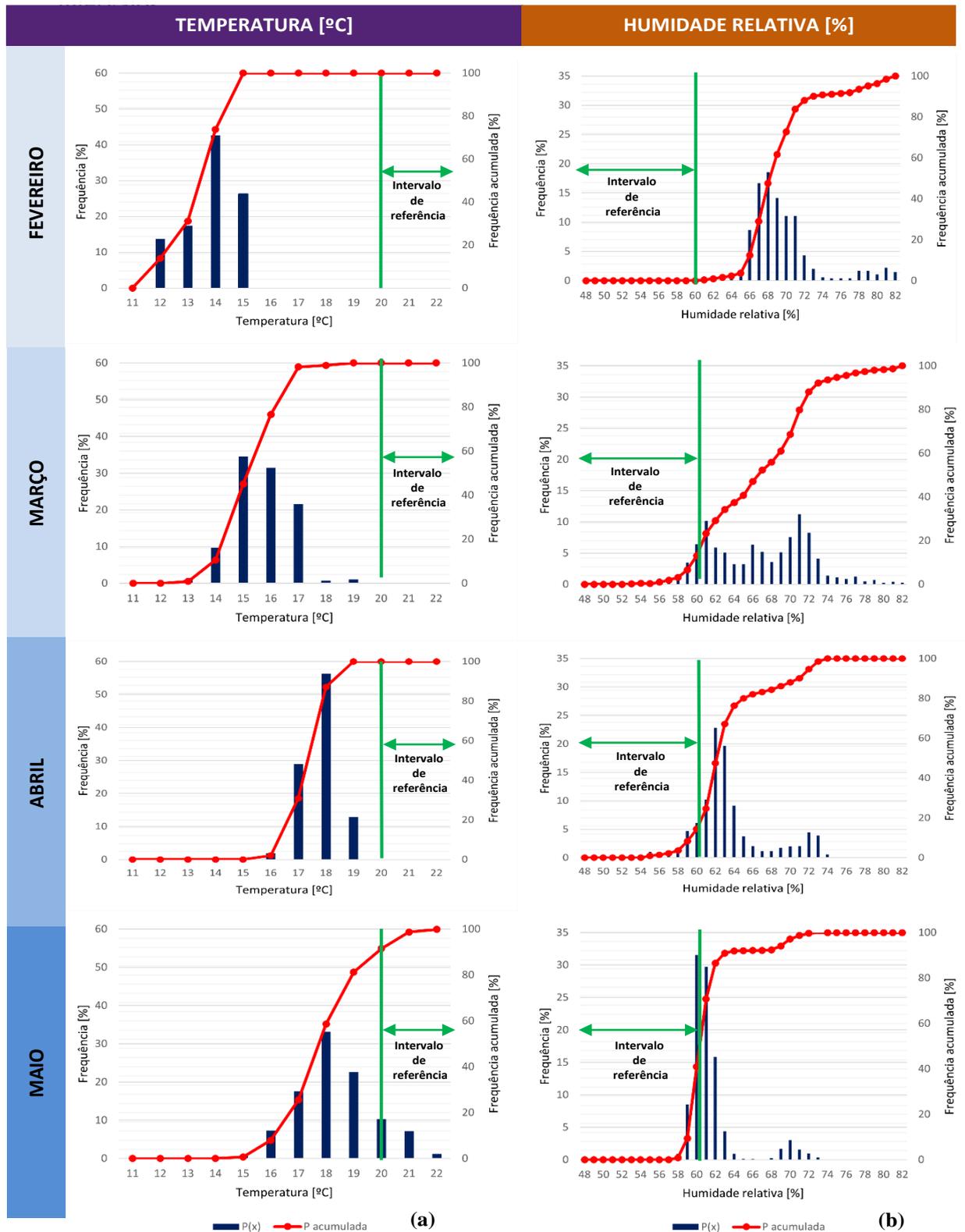


Figura 4.11 – Distribuição de frequência e frequência acumulada da temperatura (a) e humidade relativa (b) registadas no sensor interno I de fevereiro a maio de 2021

Na Figura 4.11, poucos valores de HR e T se enquadraram nos intervalos de referência. Mesmo com o desumidificador ligado, durante a maior parte desse período, e considerando-se a incerteza nominal de HR $\pm 2\%$ e T $\pm 0,2^\circ\text{C}$. Valores de humidade relativa elevados, são atingidos no mês de fevereiro. Por exemplo, em que cerca de 50% dos casos a HR atinge valores superiores a 68%, ou seja, indicam uma necessidade de desumidificar o ar. Segundo Ferreira (2008), essa gama de valores de HR favorece o processo de corrosão. Tal patologia foi detetada visualmente em alguns itens da coleção (Figura 3.3). Os danos na coleção somente não são maiores, pois os objetos adaptaram-se, ao longo do tempo, a esse microclima, processo designado por aclimação.

Ao atingir valores de humidade relativa superiores a 75%, os principais danos ocorrem, segundo informado nos capítulos anteriores. As peças estão expostas a valores iguais ou superiores a este em cerca de 10% das medições nos meses de fevereiro e março. Em termos da temperatura, o fato dos resultados, na maioria dos casos, não estarem fora da zona de referência não é tão crítico quanto no caso humidade relativa. Isto porque a temperatura costuma estar abaixo da temperatura do intervalo de referência e não o contrário. Os processos de degradação são agravados para temperaturas elevadas, o que torna a situação encontrada mais desejada.

A elevada inércia higrotérmica é vantajosa para a conservação pois modera as variações higrotérmicas. Contudo, ainda que as flutuações de HR e T sejam defasadas no tempo, é sobretudo o nível de valores de humidade relativa atingidos que levantam preocupações sobre a conservação do acervo. Para um microclima mais adequado, é necessário assegurar níveis mais seguros de HR e, somente depois de ter atingido essa situação, estabilizar o microclima. O Pavilhão está estabilizado, o que é benéfico, porém em níveis de HR indesejados.

As situações condicionadas revelam que o aquecimento auxiliou a estabilizar os níveis higrotérmicos, o que é vantajoso, mas infelizmente não em níveis adequados. Já o desumidificador reduziu HR e HA, a ventilação natural gerou uma variabilidade de HR e HA indesejada, para ser benéfica, somente com ventilação controlada. Assim, uma solução que integre aquecimento e o desumidificador, deve ser considerada.

São necessários mais estudos para aferir se a colocação de mais um desumidificador poderia reduzir a humidade a níveis mais adequados. A possibilidade de isolar, termicamente, a envolvente interior do edifício teria a vantagem de possibilitar redução no consumo energético no aquecimento, porém essa solução não aproveitaria a elevada inércia térmica como estabilizadora do microclima. Deve-se encontrar uma solução capaz de sincronizar esses interesses durante os estudos para a reabilitação do Pavilhão. Traçar um plano estratégico de como propiciar uma transição segura para a coleção museológica do Pavilhão do Círculo Meridiano é fundamental para assegurar a conservação preventiva e perpetuar esse valioso património da Universidade de Coimbra.

5. CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente estudo evidencia a importância da verificação das condições higrotérmicas para a conservação preventiva dos acervos museológicos. O controlo da temperatura e da humidade em museus é das principais maneiras de assegurar a preservação dos acervos, sendo possível de ser conseguido por meios mecânicos ou pela própria constituição do edifício.

Grandes modificações nas condições ambientais de um acervo, como a climatização, exigem a análise conjunta de uma série de intervenientes. Uma vez que, para estabilizar um ambiente pode-se danificar o acervo. Simplesmente seguir valores padrões, utilizados muitas vezes nas normas, não é garantia de conservação. Deve-se considerar a aclimação dos objetos antes de modificar totalmente o microclima.

A adequada modificação higrotérmica, conduzida após estudos de avaliação de risco juntamente à análise do microclima histórico, assegura uma transição segura que garante uma maior durabilidade ao acervo à longo prazo. Quando em coleções existentes, as medições e análises evidenciam a necessidade de algumas mudanças no microclima é preciso estudar como será feita essa modificação.

O estudo de caso do comportamento higrotérmico do Pavilhão do Círculo Meridiano do Observatório Geofísico e Astronómico da Universidade de Coimbra visou compreender o microclima desse pequeno espaço museológico. Quantificou-se os parâmetros microclimáticos de temperatura e de humidade relativa durante 4 meses e avaliou-se a adequabilidade do local para o tipo de acervo em questão.

A metodologia abordada consistiu em realizar coletas de dados dos sensores dispostos no interior e no exterior do museu, tratar esses dados e analisá-los com base numa discussão crítica. Os gráficos de dia-tipo utilizados na pesquisa são resultado de uma ampla base de dados colhida nos meses de fevereiro, março, abril e maio de 2021.

O estudo de caso mensurou as variações das condições ambientais por meio do: aquecimento, ventilação e desumidificador. As modificações impostas mostraram que esses equipamentos podem influenciar as condições higrotérmicas. A seguir, por meio dos gráficos de dia-tipo, foi possível verificar as variabilidades mensais de temperatura e humidade relativa. Para tal, foram comparadas as medições com os chamados valores de referência, para que fosse possível tirar algumas conclusões sobre a adequabilidade do espaço para a coleção.

Os gráficos de dia-tipo mostraram que o edifício de grande inércia térmica possibilita um microclima menos suscetível às amplitudes térmicas diárias. Uma vez que a variabilidade térmica influencia, diretamente, o acervo, ao serem mais moderadas as variações térmicas, a coleção fica menos exposta a ciclos de aquecimento e arrefecimento, o que é benéfico. A menor propensão que os edifícios de elevada inércia térmica possuem de se sobreaquecerem no verão é uma outra vantagem, uma vez que os danos tendem a ser muito maiores para elevadas temperaturas do que para baixas temperaturas.

O edifício mesmo sendo capaz de moderar as variações térmicas diárias, não possibilita valores de temperatura e de humidade relativa dentro dos intervalos de referência que garantem a preservação. Apesar de que o estado de conservação das peças é bom. Os elevados valores de humidade relativa no microclima, sobretudo durante o mês de fevereiro facilitam o processo de corrosão dos metais, material este que constitui a maioria dos itens da coleção.

Em seguida, foram discutidas quais seriam as modificações a serem implementadas para readequar as condições higrotérmicas. Devido aos níveis médios, as amplitudes e as frequências apresentadas mostrarem-se bastante elevadas e com uma distância significativa dos valores considerados como referência é interessante intervir no microclima. Essas modificações devem ser capazes de conciliar o correto funcionamento: da construção, da utilização e da preservação do acervo museológico.

Dentre as situações condicionadas testadas, destaca-se a solução de aquecimento e do desumidificador, a primeira, por estabilizar ainda mais o microclima, a segunda, por propiciar níveis mais adequados de humidade relativa e humidade absoluta. A combinação dessas soluções poderá trazer benefícios para a coleção. No entanto, a solução de adotar sistemas de climatização pode oferecer algum risco em caso de falha, além do aumento do gasto energético e a necessidade de estarem em constante atividade. Assim, ainda que seja possível modificar o microclima definitivamente, deve ser feita a transição com cautela, de uma forma lenta e gradual, uma vez que as peças do acervo estão aclimatadas ao ambiente nas atuais condições microclimáticas.

Além da modificação do microclima, é necessário estabelecer um plano estratégico para as soluções de reabilitação do Pavilhão, uma vez que o edifício já possui cerca de 70 anos e em breve deve ser reabilitado. Deve-se na envolvente do edifício tirar partido da elevada inércia térmica e ao mesmo tempo não modificar a fachada. O posicionamento do isolamento térmico por influenciar o efeito da inércia térmica e nos custos gerais de aquecimento deve ser ponderado com cautela. Sendo a inércia térmica uma interessante mais-valia para o microclima, não se deve colocar o isolamento térmico pelo interior do Pavilhão.

No caso de optar-se por um sistema mecânico, as medições de temperatura e de humidade relativa devem ser mantidas para garantir que o sistema está a manter as condições higrotérmicas de forma estável e que, portanto, está a funcionar na normalidade.

Durante esta pesquisa, verificou-se a necessidade de realizar outros trabalhos que pudessem caracterizar, de forma mais completa, o estudo de caso e contemplassem os demais intervenientes necessários para a tomada de decisão sobre a mudança higrotérmica do microclima. São elencadas abaixo algumas propostas para trabalhos futuros:

- Elaborar o controlo higrotérmico no local do museu a longo prazo, para poder ter dados anuais (formular parte do microclima histórico). Isto confere maiores condições para a tomada de uma decisão (apenas segundo a vertente higrotérmica) sobre a modificação do microclima;
- Promover o estudo das degradações das peças como forma de obter sinais dos possíveis impactos que o microclima está a ter no acervo. Tal estudo é fundamental para a elaboração das estratégias de conservação e de manejo do museu;
- Encontrar um intervalo de referência o mais adequado possível às condições específicas da coleção museológica do Pavilhão do Círculo Meridiano. Devem-se estudar, com maior profundidade, os tipos de metais e madeiras que compõem o acervo bem como seus comportamentos higrotérmicos;
- Inserir a componente higrotérmica como relevante fator para um possível futuro projeto de reabilitação do interior e exterior do museu. Avaliar qual o melhor posicionamento do isolamento térmico de modo a tirar partido da inércia térmica como estabilizadora microclimática e ao mesmo tempo propiciar uma redução dos consumos energéticos;
- Avaliar a influência das visitas do público nos níveis de humidade relativa interior. Essa análise é relevante para a elaboração do plano de manejo do museu;
- Fazer o teste do aquecimento e do desumidificador simultaneamente no interior do Pavilhão durante o inverno e avaliar as modificações no microclima.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Accardo, G., Camuffo, D., Giacobini, C., Marabelli, M., Parducci, P., Paribeni, M., Rossi Doria, P., Sacco, F., Santini, M., Stella Spampinato, M., Tabasso Laurenzi, M., Tampieri, F. e Torraca, G. (1979). “Fattori di deterioramento”. Corso sulla manutenzione di dipinti murali, mosaici, stucchi. Parte II, modulo 1, Istituto Centrale del Restauro, Itália.
- Alarcão, C. (2007). “Prevenir para preservar o património museológico”. *Revista de Museologia do Museu Municipal de Faro*, Vol. 2, pp. 8-33.
- Amado, M. P., Reaes Pinto, A., Alcafache, A. M., Ramalhete, I. (2015). “Construção Sustentável– Conceito e Prática”. *Caleidoscópio*, Lisboa.
- Bonvincini, C., Corgnati, S.P., Fabi, V., Filippi, M., Perino, M., Raimondo, D., Rota, M. (2010) “Conservazione preventiva e controllo microclimatico nel contesto degli standard museali”. *Sms santa maria dela scala*, Toscana, Itália.
- Bratasz, L. e Kozlowski, R. (2005). “Laser sensors fpr continuous in-situ monitoring of the dimensional response of wooden objects”. *Studies in Conservation*, Vol. 50, pp. 307-315.
- Burmester, A., Eibl, M. (2013). “Learning from history – Historic indoor climate conditions and climate control strategies”. *Climate for Collections – Standards and Uncertainties, Postprints of the Munich Climate Conference*, J. Ashley-Smith, A. Burmester, M. Eibl (Eds.), Doerner Institut, Munich, pp. 217-232.
- Camuffo, D. (2009). “La normativa per i beni culturali”. *Kermes la revista del restauro*, Ano XXI- Número 71, Editora Nardini, pp. 49-67.
- D.M. 10 maggio (2001). “Atto di indirizzo sui criteri tecnico- scientifici e sugli standard di funzionamento e sviluppo dei musei” (Art. 150, comma 6, del D.Les. n. 112 del 1998) G.U. 19 ottobre 2001, n. 244, S.O.
- Estatutos da Universidade de Coimbra (1792). “Compilados debaixo da immediata e suprema inspecção de El Rei D. José I pela Junta de Providencia Litteraria [...]” ultimamente roborados por sua magestade na sua Lei de 28 de Agosto deste presente anno. MDCCLXXII, 3 vols., Coimbra: UC, 1972 [obra fac-similada da edição de 1772].

- Fernandes, S.F.P. (2014). “Análise das condições Higrotérmicas e da qualidade do ar interior na Biblioteca Joanina da UC”. Dissertação de Mestrado em Tecnologia e Gestão do Ambiente, Faculdade de Engenharia do Ambiente, Universidade de Coimbra.
- Ferreira, C.S.F.M. (2008). “Importância da Inércia Higroscópica em Museus”. Dissertação de Mestrado em Reabilitação do Património Edificado, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto.
- Instituto Português do Mar e da Atmosfera (ITMAN) (2021). “Boletim climático mensal de Portugal continental – março 2021”. Lisboa.
- Knapp A.M. (1993). “Preservation of Museum Collections”. *Conserve O Gram*, 1/1, pp. 1-3.
- Henriques, T. A. S. (2015). “Avaliação do Clima Interior no Museu Nacional de Arte Antiga”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Perfil de Construção, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.
- Kalume @. (2020). <http://www.resfriando.com.br/psicrometria-aplicada-a-refrigeracao/> Acedido em 28/03/2021.
- Leygraf, C., Graedel T.E. (2001). “Scenarios for atmospheric corrosion in the 21st century”. *The electrochemical society interface*, Winter 2001, pp. 1-7.
- Lucero-Gómez, P., Balliana, E., Caterina Izzo, F., Zendri, E. (2020). “A new methodology to characterize indoor variations of temperature and relative humidity in historical museum buildings for conservation purposes”. *Building and Environment*, Vol. 185, Article 107147.
- Luo, X., Gu, Z., Tian, W., Xia, Y., Ma, T. (2018). “Experimental study of a local ventilation strategy to protect semi-exposed relics in a site museum”. *Energy and Buildings*, Vol. 159, pp. 558-571.
- Mecklenburg, M. F. (2007). “Determining the Acceptable Ranges of Relative Humidity and Temperature in Museums and Galleries, Part 1: Structural Response to Relative Humidity”. *Museum Conservation Institute*, Washington DC.
- Miranda H., J., Moraes O., S., Libardi L., P., Lier J., Q. (2015) “Arquivo de aula de engenharia de biosistemas”. *Física do Ambiente Agrícola*. Escola Superior Agrícola da Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, Brasil.
- RS Components@. (2021). <https://br.rsdelivers.com/product/sensirion/sht31-smart-gadget/sensirion-sht31-smart-gadget-temperature-amp/1237130>.

Acedido em: 25/04/2021.

Sensirion@. (2021). <https://www.sensirion.com/en/environmental-sensors/humidity-sensors/>.

Acedido em: 17/05/2021.

SOS eletronic s.r.o. (2021). <https://www.soselectronic.com/products/sensirion/sht-30-dis-b-sht30-dis-b2-5ks-186949>. Acedido em: 10/06/2021.

Thomson, G. (1986). “The Museum Environment”. Second Edition, ButterworthHeinemann, Grã-Bretanha, pp. 45-48.

Universidade de Coimbra@. (2021a). <https://www.uc.pt/org/observatorio/historia>.

Acedido em: 21/03/2021.

Universidade de Coimbra@. (2021b). https://www.uc.pt/org/historia_ciencia_na_uc/Textos/observa/obser.

Acedido em 22/03/2021.

Vitruvius (1931). “On Architecture – Volume I: Books 1-5”. Translated by Frank Granger, Harvard University Press, Cambridge, MA.

Wolkoff, P., Azuma, K., Carrer, P. (2021). “Health, work performance, and risk of infection in office-like environments: The role of indoor temperature, air humidity, and ventilation”. International Journal of Hygiene and Environmental Health, Vol. 233, Article 113709.

ANEXO A – FOTOGRAFIAS

Figura A.1 – (a) Vista geral do salão principal do museu. Fotografia tirada no sentido sudeste-noroeste. Ao centro o círculo meridiano em latão, ferro chumbo e vidro, construtor A. Repsold & Sohne, 1877, Hamburgo, Alemanha. Encontra-se em regular estado de conservação. (b) Esfera armilar com planetário. O modelo representa a Terra e os planetas do sistema solar conhecidos na época a rodar em torno do Sol. Materiais: bronze e marfim. Fabricado pelo célebre construtor inglês George Adams, no fim do século XVIII, Londres, Inglaterra. Encontra-se em bom estado de conservação



Figura A.2 – (a) Astrolábio Náutico, em bronze, construtor não identificado, 1675, proveniência não identificada. Encontra-se em bom estado de conservação. (b) Astrolábio, em latão, construtor não identificado, 1790, proveniência não identificada. Encontra-se incompleto e em bom estado de conservação

ANEXO B – CÓDIGO DA MACRO

Sub triagem()

' variáveis

```
Dim Itott(1 To 3, 1 To 52561) As Integer ' totalizador de leituras de temperatura por período, para cada sensor
Dim Itoth(1 To 3, 1 To 52561) As Integer ' totalizador de leituras de humidade por período, para cada sensor
Dim ttot(1 To 3, 1 To 52561) As Double ' totalizador de temperaturas por período, para cada sensor
Dim htot(1 To 3, 1 To 52561) As Double ' totalizador de humidade por período, para cada sensor

Dim t(1 To 3, 1 To 52561) As Double ' temperatura média por período, para cada sensor
Dim h(1 To 3, 1 To 52561) As Double ' humidade média por período, para cada sensor

Dim temp As Double ' leitura da temperatura de origem
Dim humid As Double ' leitura da humidade de origem

Dim linhaum As Integer ' primeira linha de dados
Dim linhatot As Integer ' número de linhas de dados

Dim marca As Integer ' número do registo atribuído à leitura
Dim linha As Integer ' linha de escrita

Dim Datainicio As Integer ' data de início para output no formato 1 a 52561
Dim Datafim As Integer ' data de início para output no formato 1 a 52561
```

' limpar células

```
Range("G2:M50001").Clear
```

```
Cells(22, 2) = ""
Cells(21, 2) = Now()

Cells(15, 2) = ""

Cells(17, 4) = ""
Cells(20, 2) = ""

Cells(20, 2) = "aguardar"

Cells(15, 2) = "em curso"
```

For sensor = 1 To 3

```
Cells(13, 2) = sensor
```

For leitura = 1 To 3

```
Cells(14, 2) = leitura
```

' carregar dados

```
linhaum = Cells(2, 16 + (leitura - 1) * 5 + (sensor - 1) * 15)
linhatot = Cells(3, 16 + (leitura - 1) * 5 + (sensor - 1) * 15)
clnhora = Cells(4, 16 + (leitura - 1) * 5 + (sensor - 1) * 15)
clntemp = Cells(5, 16 + (leitura - 1) * 5 + (sensor - 1) * 15)
clnhumi = Cells(6, 16 + (leitura - 1) * 5 + (sensor - 1) * 15)
```

' cálculo dos totais por período

```
If linhaum = 0 Then GoTo 15 ' passa à leitura seguinte o que só acontece no final porque não há linhas intercalares em branco
```

For i = linhaum To linhaum + linhatot - 1

```
marca = Cells(i, clnhora)
```

```
temp = Cells(i, clntemp)
```

```
If Itott(sensor, marca) > 10 Then GoTo 10 ' para eliminar leituras T imensas repetidas com bluetotth ligado
If temp = 9999 Then GoTo 10 ' eliminar situações de NaN na temperatura
```

```
Itott(sensor, marca) = Itott(sensor, marca) + 1
ttot(sensor, marca) = ttot(sensor, marca) + temp
```

```

10 humid = Cells(i, cinhum)

If Itoth(sensor, marca) > 10 Then GoTo 11 ' para eliminar leituras H imensas repetidas com bluetotth ligado
If humid = 9999 Then GoTo 11 ' eliminar situações de NaN na humidade

Itoth(sensor, marca) = Itoth(sensor, marca) + 1
htot(sensor, marca) = htot(sensor, marca) + humid

11 Next i

15 Next leitura

' cálculo das médias das temperaturas por periodo

For i = 1 To 52561
If Itott(sensor, i) = 0 Then GoTo 20
t(sensor, i) = Itott(sensor, i) / Itoth(sensor, i)
20 Next i

' cálculo das médias das humidades por periodo

For i = 1 To 52561
If Itoth(sensor, i) = 0 Then GoTo 21
h(sensor, i) = htot(sensor, i) / Itoth(sensor, i)
21 Next i

Next sensor

Cells(15, 2) = "OK"

' escrita com ARRAYS
'-----
'-----
Datainicio = Cells(12, 2)
Datafim = Cells(12, 3)

Dim arr() As Variant
ReDim arr(Datainicio To Datafim, 1 To 7)

For i = Datainicio To Datafim
arr(i, 7) = i

For sensor = 1 To 3
arr(i, 1 + (sensor - 1) * 2) = t(sensor, i)
arr(i, 2 + (sensor - 1) * 2) = h(sensor, i)
Next sensor

Next i

Range("G2:M50001").Value = arr

' fim
Cells(20, 2) = "OK"
Cells(22, 2) = Now()

End Sub

```

Figura B.1 – Macro utilizada no tratamento de dados do excel