



Telma Alexandra Sequeira Henriques

Licenciada em Ciências da Engenharia Civil

Avaliação do Clima Interior no Museu Nacional de Arte Antiga

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Perfil de Construção

Orientador: Doutor Fernando M. A. Henriques, Professor
Catedrático, Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Professor Doutor Filipe P. A. Santos

Arguente: Professor Doutor Daniel Aelenei

Vogal: Professor Doutor Fernando M. A. Henriques



Dezembro 2015

“Copyright” de Telma Alexandra Sequeira Henriques, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Esta dissertação de Mestrado representa um marco importante na minha vida. É a conclusão de um ciclo de formação no qual cresci não só em termos de conhecimento como pessoais.

Foram várias as pessoas que de alguma maneira contribuíram para a realização desta dissertação, a elas aqui deixo o meu sincero agradecimento.

Em primeiro lugar agradeço ao Professor Doutor Fernando Henriques pela oportunidade de realizar este trabalho. Foi para mim um privilégio trabalhar sob a orientação de um Professor que tanto admiro e que sempre vou lembrar pelo seu conhecimento e carisma.

Um agradecimento especial ao Eng.^o Hugo Silva que me acompanhou durante a realização deste trabalho. Agradeço o tempo disponibilizado, a boa vontade, a transmissão de conhecimento, as sugestões e os conselhos de amigo. Foi sem dúvida uma ajuda fundamental!

Agradeço ao Museu Nacional de Arte Antiga, em especial à Doutora Susana Campos, pela disponibilidade em receber-nos no Museu e por ter disponibilizado os registos climáticos.

Gostaria de deixar uma palavra aos meus amigos que me acompanharam ao longo do curso, sou consciente que eles sabem quem são, portanto não sinto a necessidade de enumerar os seus nomes. A eles agradeço o companheirismo, a força e as palavras amigas.

À minha família, especialmente aos meus Pais, aos meus Irmãos e à minha Avó, um enorme Obrigada por sempre acreditarem em mim, pelo apoio incondicional, incentivo e por nunca me deixarem desistir.

Resumo

Os edifícios antigos assumem um papel fundamental na sociedade uma vez que são um símbolo do passado. Muitos museus portugueses encontram-se inseridos nestes edifícios, normalmente caracterizados por microclimas próprios que nem sempre correspondem às condições ideais para uma correcta conservação das colecções. Os materiais reagem a variações de temperatura e humidade relativa, o que pode levar à sua degradação.

As directrizes para definir o clima interior têm evoluído nos últimos anos. Inicialmente procuravam-se valores exactos que garantissem ambientes ideais. No entanto, com o passar dos anos e como consequência do aumento do conhecimento esta abordagem foi substituída pela busca de intervalos sustentáveis, tendo sempre a preocupação de garantir uma correcta conservação dos materiais. Abandonou-se a procura por valores ideais e adequados a todos os climas e começou-se a definir intervalos com base no microclima histórico.

Neste trabalho pretendeu-se analisar o microclima interior do Museu Nacional de Arte Antiga, em Lisboa (Portugal) e a forma como este influencia as condições de conservação, com o estudo de 11 salas. Através de registos climáticos horários recolhidos no interior do Museu e relativos ao ano de 2014 foi efectuada uma análise do seu comportamento e averiguou-se a eficiência do sistema de climatização presente no Museu. Efectuou-se uma avaliação das condições de conservação (especificação ASHRAE) e testou-se a aplicação de uma metodologia dinâmica (metodologia FCT-UNL) com intervalos mais tolerantes, mas mantendo as condições de conservação.

Observou-se a existência de um microclima bastante estável, confirmando a presença de um sistema de climatização, onde não é possível notar o efeito da inércia térmica e onde as solicitações exteriores parecem ter apenas alguma influência no clima interior. Constatou-se ainda a ausência de condensações superficiais e verificou-se que os limites de temperatura e humidade relativa impostos não são cumpridos na maioria do tempo. No entanto, o Museu apresenta uma boa classificação geral no que respeita à qualidade do ambiente para a conservação, pelo que foi possível avançar com a sugestão de novos intervalos - dinâmicos e mais adequados às limitações do edifício.

Palavras-chave: MNAA; Museu, Microclima; Conservação Preventiva; Património Cultural.

Abstract

Old buildings play a key role in the society, in the way that they are a symbol of the past. Many portuguese museums are located in these buildings, usually characterized by microclimates that do not always correspond to the ideal conditions for a proper conservation of the collections. The materials respond to temperature and relative humidity variations, which may lead to their deterioration.

The guidelines to define the indoor climate have been evolving in the last years. Initially exact values were sought to guarantee ideal environments, however, over the years and as a result of increased knowledge, this approach was replaced by the search for sustainable ranges, always having the concern to ensure the proper conservation of the materials. The search for perfect and appropriate values to all climates was abandoned and intervals based on the historic microclimate began to be defined.

The current work aims to analyze the interior microclimate of the National Museum of Ancient Art (Lisbon, Portugal) and how it influences the conservation conditions, by studying 11 rooms. Through climate records hourly collected inside the Museum in 2014, an analysis of its behavior was carried out and the efficiency of the HAVAC system in this museum was ascertained. An assessment of the storage conditions (ASHRAE specification) was carried out and the application of a dynamic methodology (FCT-UNL methodology) with more tolerant intervals was tested, while maintaining the conservation conditions.

The existence of a very stable microclimate was observed, confirming the presence of a climatization system where it is not possible to observe the effect of thermal inertia, and where the external conditions appear to have little influence on the indoor climate. It was found the absence of surface condensation and that the imposed limits of temperature and relative humidity are not met most of the time. However, the Museum presents a good general classification with respect to environmental quality for conservation, so it was possible to come up with the suggestion of new ranges - dynamic and better suited to the building limitations.

Key-words: NMAA; Museums; Microclimate; Collection conservation; Cultural heritage.

Índice

1. Introdução	1
1.1. Enquadramento geral	1
1.2. Objectivos	1
1.3. Estrutura do trabalho	2
2. Propriedades microclimáticas	3
2.1. Considerações prévias	3
2.2. Conceito de temperatura	3
2.3. Conceito de humidade	4
2.3.1. Ar húmido	4
2.3.2. Humidade absoluta.....	5
2.3.3. Concentração de vapor de água e limite de saturação.....	5
2.3.4. Pressão parcial de vapor de água e pressão de saturação.....	6
2.3.5. Humidade relativa.....	6
2.3.6. Temperatura do ponto de orvalho	7
2.3.7. Diagrama psicrométrico.....	7
3. Comportamento higrotérmico de edifícios antigos	9
3.1. Considerações prévias	9
3.2. Temperatura em edifícios	9
3.3. Humidade em edifícios	11
4. Conservação preventiva em museus	15
4.1. Conservação do património	15
4.1.1. Definição de museu	15
4.2. Evolução das exigências higrotérmicas em museus	16
4.3. Degradação dos materiais	29
4.3.1. Degradação biológica	29
4.3.2. Degradação mecânica.....	30
4.3.3. Degradação química	31
5. Metodologia	33
5.1. Considerações prévias	33
5.2. O Museu.....	33
5.2.1. História do Museu.....	35
5.2.2. Descrição geral.....	35

5.2.3.	Funcionamento do museu	39
5.3.	Definição geral do clima de Lisboa, Portugal	40
5.4.	Registos climáticos	43
5.4.1.	Controlo microclimático e aparelhos utilizados	43
5.4.2.	Salas em estudo	43
5.5.	Tratamento de dados	46
5.5.1.	Geral	46
5.5.2.	Índice de desempenho	46
5.5.3.	Especificação ASHRAE	48
5.5.4.	Metodologia FCT-UNL	50
6.	Análise e discussão de resultados	55
6.1.	Considerações prévias	55
6.2.	Análise geral do microclima interior	55
6.2.1.	Salas de exposição	55
6.2.2.	Salas de reserva	62
6.2.3.	Salas não controladas	64
6.3.	Análise da influência da orientação e exposição	68
6.4.	Ciclos diários	70
6.4.1.	Salas de exposição	71
6.4.2.	Salas de reserva	72
6.4.3.	Salas não controladas	73
6.5.	Índice de desempenho	74
6.5.1.	Salas de exposição	74
6.5.2.	Salas de reserva	77
6.5.3.	Salas não controladas	77
6.6.	Especificação ASHRAE	78
6.6.1.	Salas de exposição	78
6.6.2.	Salas de reserva	87
6.6.3.	Salas não controladas	90
6.6.4.	Análise global	93
6.7.	Metodologia FCT-UNL	95
6.7.1.	Salas de exposição	95
6.7.2.	Salas de reserva	100
6.7.3.	Salas não controladas	102
6.7.4.	Análise global	104

7. Conclusões	107
7.1. Principais conclusões	107
7.2. Desenvolvimentos futuros.....	108
Bibliografia	109

Índice de figuras

Figura 3.1: Conceito de inércia térmica.....	11
Figura 3.2: Representação do exemplo apresentado no diagrama psicrométrico.	13
Figura 5.1: Localização do MNAA.	33
Figura 5.2: Fachada exterior do MNAA.....	34
Figura 5.3: Painéis de São Vicente.	34
Figura 5.4: Custódia de Belém.....	34
Figura 5.5: Localização dos vários corpos do edifício do MNAA, sobre pormenor de pintura de Jaime Martins Barata, 1938.	35
Figura 5.6: Fachada a poente – zona do anexo.	36
Figura 5.7: Fachada norte – zona do palácio.....	36
Figura 5.8: Fachada norte - zona da Capela.....	36
Figura 5.9: Fachada norte – zona do anexo.	36
Figura 5.10: Fachada sul – zona do anexo.....	37
Figura 5.11: Fachada sul – ligação anexo/palácio.....	37
Figura 5.12: Fachada sul- zona do palácio.	37
Figura 5.13: Fachada a nascente.....	37
Figura 5.14: Planta de todos os pisos do MNAA.....	37
Figura 5.15: Fotografia – "Primitivos Portugueses" (sala 13 - vista E-W).....	39
Figura 5.16: Fotografia - uma das salas da faiança portuguesa (sala 25 - vista W-E).....	39
Figura 5.17: Fotografia – sala "Patiño" (sala 66 - vista NE-SW).....	39
Figura 5.18: Fotografia - Capela das Albertas (vista W-E).	39
Figura 5.19: Fotografia – Mobiliário Português (sala 40 - vista E-W).	39
Figura 5.20: Fotografia - Escadaria Nobre (situa-se junto ao gabinete de gravuras e desenhos e sala do Mezanino - vista N-S).	39
Figura 5.21: Número de visitas mensais registadas pelo Museu no ano de 2014.	40
Figura 5.22: Valores de temperaturas registados na cidade de Lisboa segundo a normal clima- tológica de 1971-2000.....	41
Figura 5.23: Valores da precipitação mensal registados na cidade de Lisboa segundo a normal climatológica de 1971-2000.	41
Figura 5.24: Temperatura e precipitação anual (período 1931 – 2014)	42
Figura 5.25: Um dos sensores utilizados para medir a temperatura e humidade relativa no MNAA. ..	43
Figura 5.26: Plantas do Museu.	44
Figura 5.27: Sala 13, piso 3 (vista E-W).....	45
Figura 5.28: Sala 12, piso 3 (vista NW-SE).....	45
Figura 5.29: Sala 11, piso 3 (vista SW-NE).....	45
Figura 5.30: Sala 16, piso 2 (vista N-S).	45
Figura 5.31: Sala 25, piso 2 (vista N-S).	45
Figura 5.32: Sala 41, piso 1 (vista N-S).	45

Figura 5.33: Sala 61, piso 1 (vista NW-SE).....	45
Figura 5.34: Sala de reserva de pintura, piso -1 (vista W-E).	45
Figura 5.35: Sala de conservação de pintura, piso -1 (vista NW-SE).....	46
Figura 5.36: Capela das Albertas (sala 31/32), piso 0 (vista E-S).	46
Figura 5.37: Índice de desempenho.....	47
Figura 5.38: Exemplo de aplicação da metodologia – Índice de desempenho.....	48
Figura 6.1: Evolução do clima interior da sala 13 no ano de 2014.	56
Figura 6.2: Evolução do clima interior da sala 12 no ano de 2014.	57
Figura 6.3: Evolução do clima interior da sala 11 no ano de 2014	57
Figura 6.4: Representação, no diagrama psicrométrico, dos valores de temperatura e humidade relativa da sala 13.	58
Figura 6.5: Representação, no diagrama psicrométrico, dos valores de temperatura e humidade relativa da sala 12.	58
Figura 6.6: Representação, no diagrama psicrométrico, dos valores de temperatura e humidade relativa da sala 11.	58
Figura 6.7: Evolução do clima interior da sala 16 no ano de 2014	59
Figura 6.8: Evolução do clima interior da sala 25 no ano de 2014	59
Figura 6.9: Representação, no diagrama psicrométrico, dos valores de temperatura e humidade relativa da sala 16.	60
Figura 6.10: Representação, no diagrama psicrométrico, dos valores de temperatura e humidade relativa da sala 25.	60
Figura 6.11: Evolução do clima interior da sala 41 no ano de 2014.	61
Figura 6.12: Evolução do clima interior da sala 61 no ano de 2014	61
Figura 6.13: Representação, no diagrama psicrométrico, dos valores de temperatura e humidade relativa da sala 41.	62
Figura 6.14: Representação, no diagrama psicrométrico, dos valores de temperatura e humidade relativa pertencentes à sala 61.	62
Figura 6.15: Evolução do clima interior da sala de reserva da Casa Forte no ano de 2014.	63
Figura 6.16: Evolução do clima interior da sala de reserva de pintura no ano de 2014	64
Figura 6.17: Representação, no diagrama psicrométrico, dos valores de temperatura e humidade relativa pertencentes à sala de reserva Casa Forte.	64
Figura 6.18: Representação, no diagrama psicrométrico, dos valores de temperatura e humidade relativa pertencentes à sala de reserva de pintura.	64
Figura 6.19: Evolução do clima interior da sala de conservação de pintura no ano de 2014	65
Figura 6.20: Representação, no diagrama psicrométrico, dos valores de temperatura e humidade relativa pertencentes à sala de conservação de pintura.....	66
Figura 6.21: Evolução do clima interior da Capela das Albertas no ano de 2014	67
Figura 6.22: Representação, no diagrama psicrométrico, dos valores de temperatura e humidade relativa pertencentes à Capela das Albertas.	68
Figura 6.23: Evolução do clima interior da sala 25 e 16	69

Figura 6.24: Evolução do clima interior da sala 13 e 11	69
Figura 6.25: Evolução do clima interior das salas 25 e 41.....	70
Figura 6.26: Amplitude para os ciclos diários de temperatura e humidade relativa na sala 13.....	71
Figura 6.27: Amplitude para os ciclos diários de temperatura e humidade relativa na sala 12.....	71
Figura 6.28: Amplitude para os ciclos diários de temperatura e humidade relativa na sala 11.....	71
Figura 6.29: Amplitude para os ciclos diários de temperatura e humidade relativa na sala 16.....	72
Figura 6.30: Amplitude para os ciclos diários de temperatura e humidade relativa na sala 25.....	72
Figura 6.31: Amplitude para os ciclos diários de temperatura e humidade relativa na sala 41.....	72
Figura 6.32: Amplitude para os ciclos diários de temperatura e humidade relativa na sala 61.....	72
Figura 6.33: Amplitude para os ciclos diários de temperatura e humidade relativa na reserva Casa Forte.....	73
Figura 6.34: Amplitude para os ciclos diários de temperatura e humidade relativa na reserva de pintura.....	73
Figura 6.35: Amplitude para os ciclos diários de temperatura e humidade relativa na sala de conservação de pintura	74
Figura 6.36: Amplitude para os ciclos diários de temperatura e humidade relativa na Capela das Albertas.....	74
Figura 6.37: Desempenho do clima interior da sala 13.....	75
Figura 6.38: Desempenho do clima interior da sala 12.....	75
Figura 6.39: Desempenho do clima interior da sala 11.....	75
Figura 6.40: Desempenho do clima interior da sala 16.....	76
Figura 6.41: Desempenho do clima interior da sala 25.....	76
Figura 6.42: Desempenho do clima interior da sala 41.....	76
Figura 6.43: Desempenho do clima interior da sala 61.....	76
Figura 6.44: Desempenho do clima interior da sala de reserva Casa Forte.....	77
Figura 6.45: Desempenho do clima interior da sala de reserva pintura.	77
Figura 6.46: Desempenho do clima interior da sala de conservação de pintura.	78
Figura 6.47: Desempenho do clima interior da Capela das Albertas.....	78
Figura 6.48: Comparação dos dados medidos na sala 13 com as classes AA a D da ASHRAE.	80
Figura 6.49: Comparação dos dados medidos na sala 12 com as classes AA a D da ASHRAE.	81
Figura 6.50: Comparação dos dados medidos na sala 11 com as classes AA a D da ASHRAE.	82
Figura 6.51: Comparação dos dados medidos na sala 16 com as classes AA a D da ASHRAE.	83
Figura 6.52: Comparação dos dados medidos na sala 25 com as classes AA a D da ASHRAE.	84
Figura 6.53: Comparação dos dados medidos na sala 41 com as classes AA a D da ASHRAE.	85
Figura 6.54: Comparação dos dados medidos na sala 61 com as classes AA a D da ASHRAE.	86
Figura 6.55: Comparação dos dados medidos na sala de reserva Casa Forte com as classes AA a D da ASHRAE.	88
Figura 6.56: Comparação dos dados medidos na sala de reserva de pintura com as classes AA a D da ASHRAE.	89

Figura 6.57: Comparação dos dados medidos na sala de conservação de pintura com as classes AA a D da ASHRAE.	91
Figura 6.58: Comparação dos dados medidos na Capela das Albertas com as classes AA a D da ASHRAE.	92
Figura 6.59: Aplicação da metodologia FCT-UNL nos dados recolhidos na sala 13.....	96
Figura 6.60: Aplicação da metodologia FCT-UNL nos dados recolhidos na sala 12.....	96
Figura 6.61: Aplicação da metodologia FCT-UNL nos dados recolhidos na sala 11.....	97
Figura 6.62: Aplicação da metodologia FCT-UNL nos dados recolhidos na sala 16.....	98
Figura 6.63: Aplicação da metodologia FCT-UNL nos dados recolhidos na sala 25.....	98
Figura 6.64: Aplicação da metodologia FCT-UNL nos dados recolhidos na sala 41.....	99
Figura 6.65: Aplicação da metodologia FCT-UNL nos dados recolhidos na sala 61.....	100
Figura 6.66: Aplicação da metodologia FCT-UNL nos dados recolhidos na sala reserva Casa Forte.	101
Figura 6.67: Aplicação da metodologia FCT-UNL nos dados recolhidos na sala de reserva de pintura.....	101
Figura 6.68: Aplicação da metodologia FCT-UNL nos dados recolhidos na sala conservação de pintura.....	102
Figura 6.69: Aplicação da metodologia FCT-UNL nos dados recolhidos na Capela das Albertas.....	103

Índice de tabelas

Tabela 4.1: Classes de temperatura e humidade relativa de Thomson.	19
Tabela 4.2: Valores médios da humidade relativa de acordo com o clima.....	19
Tabela 4.3: Efeitos dos valores incorrectos de humidade relativa e temperatura nos materiais segundo o CCI.....	21
Tabela 4.4: Intervalos ideais e ciclos diários de temperatura e humidade relativa segundo a norma UNI 10829.	22
Tabela 4.5: Classes climáticas para museus, galerias, arquivos e livrarias segundo a ASHRAE	23
Tabela 4.6: Classificação de potencial climatização em edifícios.....	24
Tabela 4.7: Especificações estabelecidas pela EN 15757.	25
Tabela 4.8: Risco de deterioração devido à acção da temperatura	26
Tabela 4.9: Risco de deterioração devido à acção da humidade relativa.	27
Tabela 4.10: Metodologia de análise microclimática (FCT-UNL) e definição de limites susten- táveis de temperatura e humidade relativa para edifícios localizados em climas temperados.....	28
Tabela 5.1: Breve descrição das salas do MNAA.	38
Tabela 5.2: Características das salas em análise.	44
Tabela 5.3: Descrição e representação da especificação ASHRAE, para a classe As.....	49
Tabela 5.4: Descrição da metodologia FCT-UNL	51
Tabela 6.1: Resumo das percentagens pertencentes a cada classe climática para cada sala.	93
Tabela 6.2: Resultados globais.	94
Tabela 6.3: Valores da amplitude sazonal, flutuações de curta duração e percentagens em que cada classe climática ASHRAE é cumprida para cada sala.	104
Tabela 6.4: Percentagens pertencentes a cada classe climática em cada sala para os valores reais e para os valores a impor sugeridos pela metodologia FCT-UNL.	105
Tabela 6.5: Limitação dos ciclos diários.....	105
Tabela 6.6: Limites sustentáveis de temperatura e humidade relativa.	106

Lista de abreviaturas, siglas e símbolos

ASHRAE	American Society of Heating and Air-Conditioning Engineers, Inc
BSI	British Standard Institute
CCI	Canadian Conservation Institute
DGPC	Direcção Geral do Património Cultural
EN	European Standard
FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologia
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
ICOM	<i>Internation Council of Museums</i>
IIC	International Institute for Conservation
MNAA	Museu Nacional de Arte Antiga
PAS	Publicly Available Specification
UNI	Ente Nazionale Italiano di Unificazione
UNL	Universidade Nova de Lisboa
A	Área (m ²)
E_c	Energia cinética (J)
H_r	Humidade relativa (%)
$H_{r_{ext}}$	Humidade relativa exterior (%)
$H_{r_{int}}$	Humidade relativa interior (%)
$\overline{H_r}$	Média anual de humidade relativa (%)
k	Constante de Boltzmann (1,38 x 10 ⁻²³ J/K)
m_a	Massa de ar seco (kg)
m_v	Massa de vapor de água (kg)
$m_{v,sat}$	Massa de vapor de água saturada (kg)
P_a	Pressão parcial de ar seco (Pa)
P_v	Pressão parcial de vapor de água (Pa)

$P_{v,sat}$	Pressão de saturação de vapor de água (Pa)
q	Fluxo de calor (W/m ²)
R	Constante universal dos gases (8,3169x10 ⁷ J . mol ⁻¹ . K ⁻¹)
T	Temperatura absoluta (K)
t	Temperatura (°C)
t_{ext}	Temperatura exterior (°C)
t_{int}	Temperatura interior (°C)
\bar{t}	Média anual de temperatura (°C)
t_s	Temperatura de ponto de orvalho (°C)
V	Volume (m ³)
v	Concentração de vapor de água no ar (kg/m ³)
v_s	Limite de saturação (kg/m ³)
x_{ar}	Humidade absoluta (kg/kg)
P	Pressão atmosférica (Pa)
ρ_a	Concentração de ar seco (kg/m ³)
ρ_v	Concentração de vapor de água (kg/m ³)

1. Introdução

1.1. Enquadramento geral

Há muitos anos que o Homem tem vindo a manifestar alguma preocupação com questões relacionadas com o conforto, sobretudo ao nível das condições higrotérmicas como a temperatura e a humidade relativa. As construções antigas em pedra com paredes de elevada espessura contribuíam para uma elevada inércia térmica que proporcionava um maior conforto térmico e criava um microclima natural.

Actualmente, muitos museus portugueses encontram-se em edifícios antigos, onde a criação de microclimas artificiais se tornou uma prática corrente. O recurso a sistemas de climatização e as alterações do microclima natural que daí advêm podem conduzir à degradação dos materiais. Nesse sentido, a caracterização das condições climáticas do ambiente interior nos museus é essencial para uma correcta conservação e preservação dos acervos museológicos que chegam até aos dias de hoje como testemunhas da história e identidade de um país.

As abordagens existentes têm vindo a evoluir, abandonando-se a preocupação exclusiva com o conforto dos visitantes que se mantinha sob argumento de existir a necessidade de agradar as pessoas que se deslocavam às exposições e passou-se a dar prevalência aos parâmetros ambientais de forma a praticar uma correcta conservação/preservação das colecções, mantendo a sua autenticidade para as gerações futuras.

Esta preocupação em mitigar os riscos de degradação, consequência das variações e picos de temperatura e humidade relativa, levou, por vezes, à imposição de limites demasiado exigentes destes parâmetros.

Durante muitos anos as orientações nem sempre foram baseadas em trabalhos científicos, por vezes os valores de temperatura e humidade relativa sugeridos eram definidos de acordo com a experiência e observação da resposta dos materiais. Era comum limitar as variações de temperatura e humidade relativa de museus a valores demasiado constantes, pensando-se que a melhor resposta dos materiais era conseguida para valores de 20 °C de temperatura e 50 % de humidade relativa. No entanto, estes limites foram impostos numa época em que os custos de energia não eram um problema. Hoje em dia, um dos desafios em edifícios históricos, tais como museus, é conseguir um equilíbrio entre a conservação, conforto e economia de energia.

Apesar de vários estudos revelarem a importância do controlo das condições climáticas no interior dos museus, esta questão do ambiente interior de edifícios de relevo histórico tem tardado a assumir o papel preponderante que merece, sobretudo a nível nacional [1].

1.2. Objectivos

A presente dissertação tem como objectivo caracterizar o microclima interior de um museu localizado no interior de um edifício antigo – Museu Nacional de Arte Antiga, em Lisboa.

Com este estudo pretendeu-se obter o conhecimento geral do microclima interior do museu em análise e avaliar as interacções entre o interior e o exterior, verificando-se a influência da orientação das suas fachadas. Este edifício está equipado com um sistema de climatização, onde são impostos valores de

temperatura e humidade relativa. Assim, pretendeu-se avaliar a influência do sistema de climatização e a sua eficácia de forma a reflectir sobre a relação entre os limites impostos e os valores atingidos.

Dada a importância do acervo museológico, considerou-se importante fazer uma avaliação do risco de degradação a que os materiais estão expostos, recorrendo-se a uma especificação presente no manual da *American Society of Heating and Air-Conditioning Engineers, Inc* – ASHRAE, dedicado a museus, bibliotecas e arquivos.

Por fim, procurou-se definir limites sustentáveis de temperatura e humidade relativa para as salas em análise com recurso a uma metodologia dinâmica e com base no microclima histórico – metodologia FCT-UNL.

1.3. Estrutura do trabalho

A presente dissertação está organizada em sete capítulos.

O capítulo 1 diz respeito à introdução do trabalho, onde se faz um enquadramento do tema e são apresentados os principais objectivos e a forma como se encontra organizado.

No capítulo 2 descreve-se o conceito de microclima, temperatura e humidade relativa através de propriedades particulares como a humidade absoluta, a concentração de vapor de água, pressão parcial de vapor de água, humidade relativa e temperatura de ponto de orvalho. Por fim, é descrita a utilidade e o funcionamento do diagrama psicrométrico.

O capítulo 3 diz respeito ao comportamento higrotérmico de edifícios antigos. É abordada a questão da temperatura e humidade em edifícios.

O capítulo 4 aborda a conservação do património e a sua importância. Numa segunda parte é descrita a evolução histórica das exigências higrotérmicas em museus e por fim são apresentados os mecanismos de degradação.

No capítulo 5 é descrito o museu em estudo, são mencionados alguns aspectos da sua história e define-se de uma forma geral o clima em Lisboa. Apresenta-se ainda uma breve descrição dos aparelhos utilizados para recolha dos dados, as salas em estudo e as metodologias utilizadas para o tratamento dos dados.

No capítulo 6 é apresentada a análise e discussão dos resultados obtidos através das metodologias e análises efectuadas. Primeiramente é realizada uma análise geral do microclima interior onde é avaliada a influência das solicitações exteriores. De seguida, através da comparação do comportamento de algumas salas estrategicamente seleccionadas é estudada a influência que a orientação e exposição têm no microclima interior. Num terceiro sub-capítulo são avaliados os ciclos diários típicos onde se pretende confirmar algumas conclusões avançadas anteriormente. De forma a compreender a eficiência do sistema de climatização do Museu é calculado o índice de desempenho e é avaliado o risco de degradação dos materiais através da aplicação da especificação ASHRAE. Por fim, é aplicada uma metodologia dinâmica intitulada FCT-UNL que permite definir novos limites de temperatura e humidade relativa.

O capítulo 7 constitui a conclusão de todo o trabalho realizado e é onde são sugeridos os desenvolvimentos futuros considerados importantes.

2. Propriedades microclimáticas

2.1. Considerações prévias

De forma a analisar o microclima de um edifício e compreender todo o seu comportamento é fundamental começar por introduzir algumas propriedades físicas, como por exemplo a temperatura, humidade relativa, concentração de vapor de água, pressão parcial de vapor de água e a temperatura de ponto de orvalho.

O termo microclima é utilizado para definir o clima de uma determinada área. O prefixo micro, que compõe a palavra “microclima”, delimita o tamanho da área envolvida. Esta definição para além de englobar um artefacto específico estende-se também a todo o edifício histórico, estátua ou pequena exposição, à sua envolvente e às trocas higrótérmicas desenvolvidas entre si [2].

Na prática assume-se que o microclima é uma síntese de condições ambientais físicas, quer devido a variáveis atmosféricas (temperatura, humidade relativa, vento e sol) ou a trocas com outros corpos (emissão de infravermelhos, aquecimento, ventilação e iluminação) durante um período de tempo representativo [3].

Tradicionalmente os ambientes interiores e exteriores são considerados de forma bastante distinta. Porém, na prática apresentam problemas muito semelhantes. Ambos estão sujeitos a ciclos diários de temperatura e humidade relativa causados pelo ciclo solar ou por aquecimento forçado. A distinção entre os dois reside no facto de o microclima interior poder ser controlado [2].

As investigações acerca do microclima destinam-se não só a estudar o microclima interior-exterior, mas também a perceber se os microclimas artificiais (muitas vezes verificados em museus) são positivos para a conservação do acervo [3].

2.2. Conceito de temperatura

Para que ocorram transferências de calor é necessária a existência de diferenças de temperatura entre duas zonas. A temperatura é, assim, condição determinante para definir a direcção do fluxo de calor entre dois corpos, sendo que a passagem de calor ocorre do elemento mais quente para o mais frio [4].

Na perspectiva da termodinâmica e de acordo com o princípio da equipartição da energia, a temperatura representa a média da energia cinética, E_c (J), das moléculas de um dado gás:

$$E_c = \frac{3}{2} \cdot k \cdot T \quad (2.1)$$

em que k é a constante de Boltzmann e toma o valor de $1,38 \times 10^{-23}$ J/K. T é a temperatura que devido a esta relação é também conhecida como temperatura molecular.

Geralmente, a temperatura em Kelvin (K) é representada com letra maiúscula “T” enquanto a temperatura com letra minúscula “t” indica que esta se encontra em graus Celsius (°C). A expressão seguinte exprime a relação entre as duas temperaturas:

$$t = T - 273,15 \quad (2.2)$$

O valor 273,15 K diz respeito à temperatura do ponto triplo da água, isto é, a temperatura para a qual os três estados da matéria (sólido, líquido e gasoso) coexistem em equilíbrio termodinâmico.

Embora a noção de temperatura esteja associada aos gases, pode ser facilmente extrapolada para os líquidos e sólidos, utilizando a definição simplista de que a temperatura é a variável medida por um termómetro. Caso não existam erros, o termómetro mede somente a temperatura do seu bolbo, que pode não coincidir exactamente com a temperatura do objecto em análise. Na verdade, para existir um equilíbrio termodinâmico tem que existir um equilíbrio entre as trocas caloríficas por condução, convecção e radiação, que são distintas de objecto para objecto e de material para material. A temperatura pode mesmo variar ao longo da superfície de um mesmo objecto ou material [2].

2.3. Conceito de humidade

O termo “humidade” usado frequentemente, torna-se ambíguo quando se tem como objectivo estudar o estado higrométrico do ar, por esta razão este parâmetro é analisado recorrendo à definição de propriedades mais particulares tais como a humidade absoluta, a concentração de vapor de água e limite de saturação, a pressão parcial de vapor de água e pressão de saturação, a humidade relativa e a temperatura de ponto de orvalho.

2.3.1. Ar húmido

Admite-se que o “ar” que constitui a atmosfera, designado “ar húmido” é constituído por ar seco e vapor de água. O primeiro é composto por uma mistura de gases, sensivelmente 21 % em volume de oxigénio, 78 % de azoto e 1 % de outros gases, tais como dióxido de carbono e dióxido de enxofre [4].

Assumindo que o ar seco e o vapor de água comportam-se como gases ideais, ou seja, as suas moléculas não exercem forças entre si, é possível aplicar a equação dos gases perfeitos:

$$P_x V = m_x R_x T \quad (2.3)$$

Em que P representa a pressão parcial (Pa), m a massa (kg), V o volume (m^3), T é a temperatura medida em Kelvin e R é a constante dos gases (J/kg.K). Para o ar seco, a constante dos gases assume o valor de 278,055 J/kg.K e para o vapor de água 461,52 J/kg.K.

A concentração (ρ) de ar seco e vapor de água (kg/m^3) é traduzida por:

$$\rho_a = \frac{m_a}{V} = \frac{P_a}{R_a T} \quad (2.4)$$

$$\rho_v = \frac{m_v}{V} = \frac{P_v}{R_v T} \quad (2.5)$$

onde o índice a representa o ar seco e v o vapor de água.

Uma vez que os gases que constituem o ar seco e o vapor de água não reagem, a lei de Dalton permite definir que a pressão total de ar húmido é dada pela soma das pressões parciais de ar seco e vapor de água:

$$P = P_a + P_v \quad (2.6)$$

em que P é a pressão atmosférica (101,3 kPa ao nível do mar) [4].

2.3.2. Humidade absoluta

Designa-se por humidade absoluta (x_{ar}) a quantidade de vapor de água existente no ar, traduzida em kg de vapor de água por kg de ar [4].

Este parâmetro corresponde à relação entre a massa de vapor de água (m_v) e a massa de ar húmido ($m_a + m_v$):

$$x_{ar} = \frac{m_v}{m_a + m_v} \quad (2.7)$$

O parâmetro x_{ar} é adimensional e normalmente é apresentado em kg/kg. Pode em alternativa ser apresentado em percentagem ou, por ser um valor bastante pequeno, pode ser multiplicado por 1000, passando a ser expresso em g/kg. Este parâmetro representa, desta forma, a massa de vapor de água em gramas contido em cada quilograma de ar húmido [2].

2.3.3. Concentração de vapor de água e limite de saturação

Designa-se por concentração de vapor de água (v) a quantidade de vapor de água existente no ar, traduzida em kg de vapor de água por unidade de volume de ar (m^3).

A capacidade do ar para absorver água é limitada. O limite de saturação (v_s) define um valor a partir do qual o ar não pode absorver mais humidade, ou seja, é a quantidade máxima de vapor de água que o ar pode conter e é, por isso, expresso nas mesmas unidades. A tentativa de introduzir mais vapor de água a partir deste ponto origina condensações.

O limite de saturação depende da temperatura e varia na sua razão directa, aumentando com o aumento da temperatura.

Assim, a quantidade máxima de vapor de água que o ar pode conter pode ser calculada em função do valor da temperatura por uma das seguintes equações [4]:

$$v_s = 0,6257 \cdot \frac{\left(1,098 + \frac{t}{100}\right)^{8,02}}{t + 273,15} \quad \text{Para } 0^\circ\text{C} \leq t \leq 30^\circ\text{C} \quad (2.8)$$

$$v_s = 0,01016 \cdot \frac{\left(1,486 + \frac{t}{100}\right)^{12,3}}{t + 273,15} \quad \text{Para } -20^\circ\text{C} \leq t < 0^\circ\text{C} \quad (2.9)$$

Conhecendo o valor da humidade relativa é possível determinar a concentração de vapor de água:

$$v = Hr \cdot v_s \quad (2.10)$$

2.3.4. Pressão parcial de vapor de água e pressão de saturação

A pressão parcial de vapor de água no ar (P_v), (expressa em Pa), define-se como a pressão que esse vapor de água teria se ocupasse individualmente o volume ocupado pela respectiva massa de ar. Conhecendo o valor da concentração de vapor de água (v) (em kg/m³), pode-se determinar a pressão parcial de vapor de água através da equação:

$$P_v = 461,4 \cdot (t + 273,15) \cdot v \quad (2.11)$$

As pressões que dizem respeito ao limite de saturação designam-se por pressões de saturação ($P_{v,sat}$) e podem ser calculadas, dependendo do valor da temperatura, pelas seguintes equações [4]:

$$P_{v,sat} = 610,5 e^{\left(\frac{17,269 \cdot t}{237,3+t}\right)} \quad \text{Para } t > 0 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.12)$$

$$P_{v,sat} = 610,5 e^{\left(\frac{21,875 \cdot t}{265,5+t}\right)} \quad \text{Para } t \leq 0 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.13)$$

2.3.5. Humidade relativa

O ar comporta-se como uma mistura de gases e vapor de água que formam a atmosfera. É necessário distinguir ar seco e ar húmido. O ar é designado como seco em duas situações. A primeira diz respeito à inexistência de vapor de água, a segunda quando não ocorrem condensações, ou seja, a mistura comporta-se como um gás ideal sem mudança de fase. Por outro lado, o ar diz-se húmido quando ocorre o oposto das duas situações anteriores [2].

A humidade relativa é expressa em percentagem e, como o próprio nome indica, traduz uma relação entre grandezas. Este parâmetro pode ser definido como a relação entre a quantidade de vapor de água que uma massa de ar realmente contém (v) e a quantidade máxima de vapor de água que essa massa poderia conter (v_s) para determinada temperatura, como se verifica na equação 2.14:

$$Hr = \frac{v}{v_s} \times 100 (\%) \quad (2.14)$$

Quando se refere, a título de exemplo, que a humidade relativa é de 80 %, apenas se está a referir que a quantidade de vapor de água que o ar contém corresponde a 80 % da quantidade máxima que o mesmo ar pode conter a uma dada temperatura. Não se pode concluir directamente a partir do valor da humidade relativa se a quantidade de vapor de água que realmente existe é elevada ou baixa [4].

Adicionalmente, o valor da humidade relativa pode ser obtido através do quociente entre a pressão de vapor de água (P_v) e a pressão correspondente ao limite de saturação ($P_{v,sat}$):

$$Hr = \frac{P_v}{P_{v,sat}} \quad (2.15)$$

É ainda possível definir a humidade relativa como a relação entre a massa de vapor de água efectivamente presente em qualquer volume de ar (m_v) e o máximo valor de água admissível para a mesma temperatura ($m_{v,sat}$):

$$Hr = \frac{m_v}{m_{v,sat}} \quad (2.16)$$

Esta equação representa, fisicamente, o grau de saturação ao vapor de água [2].

2.3.6. Temperatura do ponto de orvalho

A temperatura do ponto de orvalho (t_s) traduz de uma forma simples a noção de humidade em termos de temperatura. O ponto de orvalho define-se como a temperatura para a qual o ar atinge a saturação e pode ser calculada através da temperatura t (°C) e da humidade relativa Hr (%), como se pode ver na equação 2.17:

$$t_s = \frac{237,3 \cdot \left(\ln(Hr) + \frac{17,269 \cdot t}{237,3 + t} \right)}{17,269 - \left(\ln(Hr) + \frac{17,269 \cdot t}{237,3 + t} \right)} \quad (2.17)$$

A temperatura do ponto de orvalho também pode ser calculada a partir as condições de saturação, através da pressão de saturação de vapor de água. O cálculo é efectuado considerando diferentes intervalos de pressão [4]:

$$t_s = \frac{237,3 \cdot \ln\left(\frac{P_{v,sat}}{610,5}\right)}{17,269 - \ln\left(\frac{P_{v,sat}}{610,5}\right)} \quad \text{Para } P_{v,sat} \geq 610,5 \text{ Pa} \quad (2.18)$$

$$t_s = \frac{265,5 \cdot \ln\left(\frac{P_{v,sat}}{610,5}\right)}{21,875 - \ln\left(\frac{P_{v,sat}}{610,5}\right)} \quad \text{Para } P_{v,sat} < 610,5 \text{ Pa} \quad (2.19)$$

2.3.7. Diagrama psicrométrico

O diagrama psicrométrico permite relacionar a concentração de vapor de água, pressão de saturação, humidade relativa e temperatura, constituindo uma excelente ferramenta para a compreensão das variações do estado higrométrico do ar.

Este diagrama apresenta em abcissas os valores de temperatura do ar (°C), em ordenadas os valores de concentração de vapor de água (g/m³) e da pressão parcial (Pa) e um conjunto de curvas de humidade relativa (%). As linhas horizontais representam pontos com igual concentração de vapor de água e as verticais pontos com igual temperatura. Cada curva do diagrama é constituída por pontos de igual humidade relativa [4]. No sub-capítulo 3.3 apresenta-se um exemplo de aplicação.

3. Comportamento higrotérmico de edifícios antigos

3.1. Considerações prévias

O conceito de comportamento higrotérmico de edifícios expressa o conjunto de fenómenos relacionados com a temperatura ou com a humidade do ar que influenciam o comportamento das construções quando sujeitas à sua acção [4].

3.2. Temperatura em edifícios

O clima interior dos edifícios segue as tendências exteriores, apesar da influência das solicitações exteriores depender da solução construtiva adoptada, da arquitectura do edifício, da sua orientação, da presença de sistemas de climatização ou da ocupação humana.

Nem todas as divisões de um edifício apresentam os mesmos valores de temperatura pois exposições diferentes para o mesmo edifício conduzem a um saldo de calor diferente. Em Portugal a orientação a sul é a que mais optimiza os ganhos solares. Desta forma, as fachadas voltadas a sul apresentam uma temperatura superficial mais elevada comparativamente com as fachadas orientadas a norte. As zonas interiores de um edifício são as que apresentam valores de temperatura mais estáveis. No caso do piso térreo, o solo possui uma elevada capacidade de reserva de calor, reduzindo as oscilações de temperatura. Verifica-se o contrário nos pisos em contacto com a cobertura, onde esta recebe a radiação solar durante o dia e liberta radiação infravermelha durante a noite. No entanto, a existência de sistemas de climatização e a presença de pessoas podem alterar drasticamente o equilíbrio natural do microclima [2].

Numa sala fechada o ar distribui-se segundo a sua densidade. O ar frio e mais denso concentra-se na zona inferior, enquanto o ar quente e menos denso encontra-se na zona superior. No contexto, é portanto comum afirmar-se que o ar quente sobe. O ar interior pode ter dois tipos de comportamento: apresentar uma estratificação por temperaturas ou desenvolver fenómenos convectivos. Considerando o primeiro caso, no Verão, quando o pavimento está mais frio e o tecto se encontra mais quente comparativamente com o ar adjacente, as trocas entre o ar e as superfícies aumentam a intensidade de estratificação do ar por temperaturas, permanecendo imóvel. Para o segundo caso, no Inverno, quando o pavimento está mais quente e o tecto se encontra mais frio, o ar ao entrar em contacto com o pavimento irá aquecer e conseqüentemente subir, arrefecendo posteriormente ao encontrar a cobertura mais fria, ganhando densidade e voltando a descer. Desta forma, origina-se uma corrente convectiva [5].

Os edifícios mais recentes, geralmente caracterizados por paredes com pouca espessura e reduzida massa, são afectados com mais facilidade pelos ciclos diários de temperatura. As janelas, por sua vez, possibilitam a penetração de raios solares e conseqüentemente a criação de um efeito de estufa, influenciando ainda as trocas de ar com o exterior.

Nas construções antigas, as paredes exteriores são, normalmente, caracterizadas por uma elevada espessura e grande massa, o que lhes confere a capacidade de reter uma grande quantidade de calor, contribuindo bastante para manter um microclima estável.

A elevada espessura e a grande massa dos elementos conferem uma forte inércia térmica a estes edifícios. É usual verificar um desfasamento e amortecimento importantes entre a temperatura do ar no

exterior e no interior [6]. É por esta razão que, mesmo sem qualquer tipo de isolamento térmico, a temperatura das paredes interiores apenas atinge o equilíbrio com a temperatura média do ar exterior na fase final do Verão e do Inverno. Os elementos absorvem energia durante o Verão e libertam, posteriormente, durante o Inverno. Durante o Outono verifica-se que as temperaturas interiores são superiores à temperatura média exterior, estando próximas dos valores máximos diários (exteriores) [7].

De modo a compreender o conceito de inércia térmica considere-se uma parede que separa dois ambientes, ambos à mesma temperatura. Nestas condições o fluxo de calor que a atravessa é nulo. Suponha-se uma segunda situação em que num dos ambientes a temperatura sobe alguns graus, de modo que $t_{ext} > t_{int}$. O fluxo não atravessa imediatamente a parede, aquecendo-a gradualmente com a onda de calor a atingir o ambiente interior com um determinado desfasamento temporal.

Considerando que as variações da temperatura exterior são periódicas e variam de forma sinusoidal entre os valores mínimos e máximos e assumindo-se a temperatura interior como constante (Figura 3.1 - a) é possível encontrar três situações distintas.

Para o caso de uma parede infinitamente ligeira, para a qual as transferências de calor ocorrem instantaneamente, o fluxo de calor que a atravessa em cada instante seria o representado na Figura 3.1 - b. Os valores positivos e negativos do fluxo determinam o sentido em que a transmissão de calor ocorre. Note-se que existe uma concordância total no tempo entre os diversos pontos singulares dos dois gráficos referidos, não ocorrendo qualquer desfasamento entre as temperaturas e os fluxos.

Admitindo-se agora que a parede tem uma massa infinita, verifica-se o amortecimento total do fluxo de calor, que nunca chega a afectar o ambiente interior, o que se traduz num fluxo constante (Figura 3.1 - c).

Nas situações correntes os elementos de construção situam-se entre os dois casos, ou seja, a sua massa nem é nula nem infinita. A curva das variações de fluxo oscila em torno de q_2 , mas com amplitudes menores do que q_1 e com algum desfasamento (Figura 3.1 - d) [4].

Como se viu, a inércia térmica é função da massa do elemento. Quanto menor for o isolamento térmico de um material, maior será a sua inércia térmica, uma vez que a resistência térmica varia na relação inversa à massa volúmica.

Assim, pode-se definir inércia térmica como a capacidade que os elementos construtivos podem dispor para amortecer e desfasar o fluxo de calor que os atravessa, concluindo-se que o amortecimento térmico é a capacidade da envolvente reduzir a amplitude das variações térmicas e que o desfasamento corresponde ao intervalo de tempo que decorre até que o fluxo de calor atravessa a parede e consiga atingir o ambiente interior [4].

Contudo, a presença de elementos perturbadores tais como sistemas de climatização, presença de pessoas ou a iluminação podem alterar o comportamento típico destes edifícios.

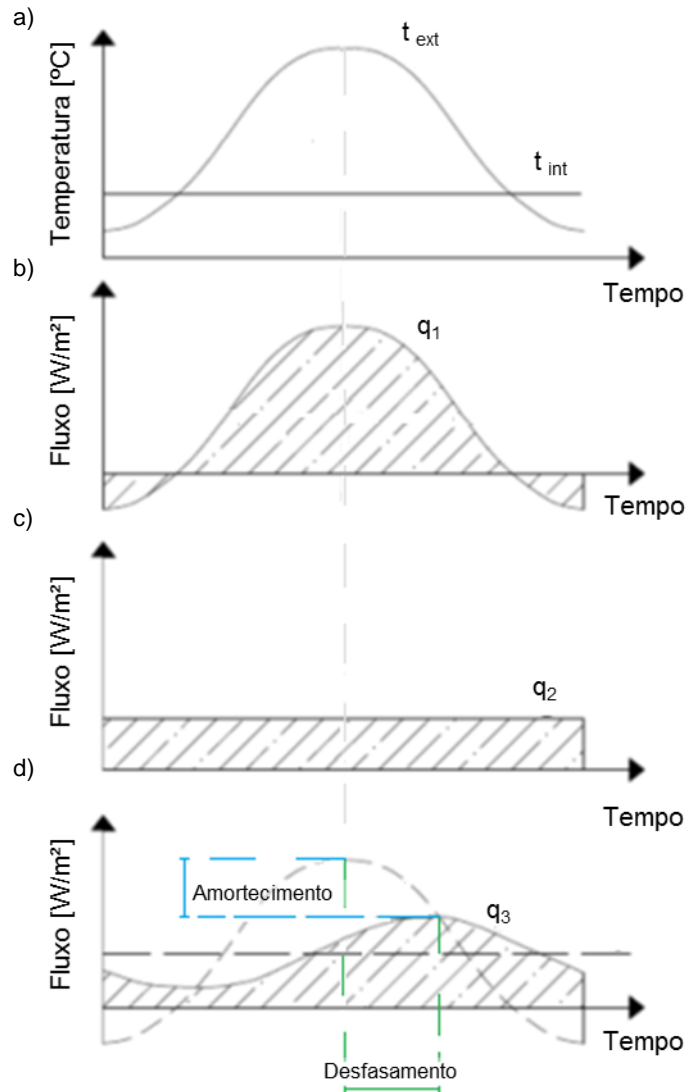


Figura 3.1: Conceito de inércia térmica (adaptado de [4]).

3.3. Humidade em edifícios

A humidade afecta significativamente o conforto e a saúde dos ocupantes, a qualidade do ar e a durabilidade do edifício e dos seus materiais, pois trata-se de uma das principais causas de anomalias em edifícios. Este parâmetro é influenciado por factores como a temperatura, ventilação e pela produção de vapor de água.

Para além dos factores já enumerados, a humidade relativa interior é fortemente influenciada pela higroscopicidade dos materiais interiores. Considere-se um corpo poroso colocado num ambiente com vapor de água, esse corpo retém alguma dessa água sob a forma líquida. O processo de adsorção refere-se à adesão de moléculas de água à superfície dos poros. Este processo não deve ser confundido com a absorção, que corresponde à migração de água líquida pelo interior dos poros [4]. Simplificando, pode-se considerar que a adsorção ocorre na superfície e a absorção envolve o interior da estrutura [8].

Considerando um material de construção típico com porosidade aberta, um incremento de humidade relativa conduz a uma adsorção progressivamente maior. Caso o material tenha sais higroscópicos no seu interior, nomeadamente cloretos e nitratos, o efeito de adsorção é intensificado devido à capacidade que estes sais possuem de adsorver grandes quantidades de vapor de água. O fenómeno inverso à adsorção designa-se por desadsorção, ou seja, é a perda de água quando a humidade relativa diminui. A desadsorção é bastante mais lenta do que a adsorção. A diferença de comportamento entre estes dois fenómenos designa-se por *histeresis*. A histerese é muito acentuada na generalidade dos materiais com base em ligantes minerais, como por exemplo os betões e as argamassas. No entanto, para outros tipos de materiais, nomeadamente as madeiras e alguns tipos de pedras, o efeito da histerese pode ser considerado negligenciável, pois é quase nulo [4].

O efeito da inércia térmica e das variações de temperatura e humidade relativa do ar podem provocar condensações superficiais. O aumento de humidade relativa como consequência do arrefecimento de uma massa de ar mantendo a concentração de vapor de água constante pode conduzir à saturação. Quando o limite de saturação é atingido verificam-se condensações de vapor de água que, por se desencadearem nos paramentos das paredes, tectos ou pavimentos, designam-se como “superficiais” [4].

No interior de edifícios correntes em condições de Inverno a temperatura das superfícies construtivas (temperaturas superficiais) é inferior à temperatura do ar ambiente, pois o arrefecimento da massa de ar ocorre de uma forma localizada junto aos paramentos das paredes exteriores. Deste modo e mesmo com isolamento térmico adequado, a humidade relativa junto aos paramentos é mais elevada do que a restante massa de ar, o que em casos extremos pode conduzir à ocorrência de condensações [4].

Para as construções antigas com uma inércia térmica forte é frequente encontrar condensações superficiais na Primavera. Durante este período do ano a temperatura exterior começa a aumentar e normalmente é acompanhada também por um aumento da concentração de vapor de água. No entanto esse aumento não é acompanhado pelo interior, onde o ambiente e as superfícies mantêm-se sob a influência da estação anterior. Por consequência da ventilação regular das construções, quer através de janelas quer através de portas ou outras aberturas para o exterior, o ar é conduzido para o interior. Este ar proveniente do exterior ao chegar ao interior vai arrefecer gradualmente, alcançando valores bastante baixos junto às superfícies que se encontram a uma temperatura mais reduzida do que a do ar. O decréscimo de temperatura é acompanhado por um aumento da humidade relativa que ao atingir o respectivo limite de saturação leva à ocorrência de condensações superficiais [6].

Considere-se, a título de exemplo, para melhor compreender este conceito, um edifício com uma elevada inércia térmica. A temperatura interior é de 15 °C, sendo 13 °C nos paramentos das paredes. Suponha-se um dia de Primavera que regista uma temperatura de 20 °C e 70 % de humidade relativa. Quando o ar exterior é transportado para o interior e arrefece até aos 15 °C, a sua humidade relativa atinge os 95 %. Se a superfície da parede estiver a 13 °C, esse ar atingirá o limite de saturação e consequentemente verificar-se-ão condensações. Note-se que neste caso, não se considerou qualquer produção de vapor de água, produzido, por exemplo, pela presença de pessoas. Na Figura 3.2 é possível visualizar a representação gráfica do exemplo apresentado.

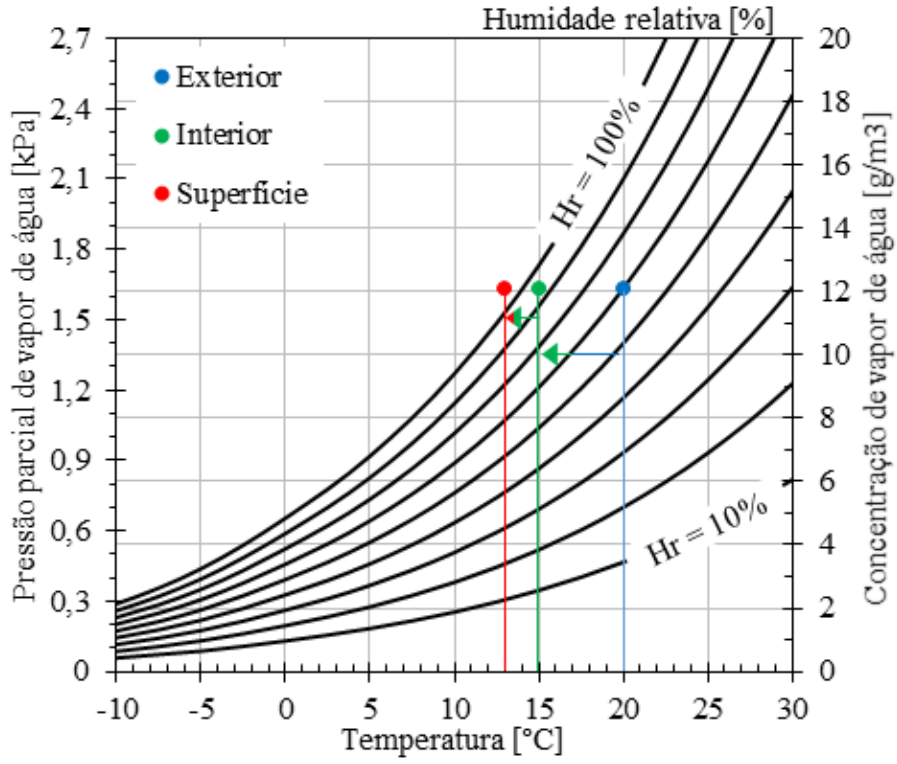


Figura 3.2: Representação do exemplo apresentado no diagrama psicrométrico.

4. Conservação preventiva em museus

4.1. Conservação do património

É do conhecimento geral que desde a sua existência o Homem procurou construir abrigos para sua protecção e dos seus bens. Ao longo dos séculos, por descoberta de novos materiais e técnicas construtivas, estas construções foram evoluindo. Desta forma foram surgindo pequenas habitações, bem como edifícios de maior dimensão, como é o caso dos edifícios religiosos e castelos.

É importante estabelecer que nem todos os edifícios antigos podem ser considerados monumentos ou património, pois alguns deles suportam na sua história apenas o decorrer dos anos, não apresentando qualquer significado cultural. A questão central do significado cultural reside na compreensão do seu contributo. Este pode ser tão diverso como o valor artístico, científico, histórico, paisagístico, social ou técnico [9].

Todos os monumentos constituem um marco histórico na memória colectiva. Para que seja considerado como património é necessário que lhe seja reconhecido um determinado valor intrinsecamente ligado à identidade e produto daquela nação. De acordo com a Carta de Cracóvia é possível definir Património como “(...) o conjunto das obras do Homem nas quais uma comunidade reconhece os seus valores específicos e particulares e com os quais se identifica. A identificação e a valorização destas obras como património é, assim, um processo que implica a selecção de valores” [10].

O mesmo documento define Monumento como “uma entidade identificada como portadora de valor e que constitui um suporte da memória. Nele, a memória reconhece aspectos relevantes relacionados com actos e pensamentos humanos, associados ao curso da história e, todavia, acessíveis a todos” [10].

Monumento não é apenas uma grande criação, é também uma construção singular que com o tempo adquiriu um significado cultural. O reconhecimento da cultura como elemento estruturante da sociedade tem-se traduzido num significativo aumento do número e da diversidade de museus. As comunidades reclamam-nos não só pelas suas funções mais tradicionais de conservação e divulgação da memória colectiva, mas enquanto lugares operativos de vida cultural [11].

4.1.1. Definição de museu

O Decreto-Lei nº 47/2004 define, no seu 4º artigo, museu como “*uma instituição de carácter permanente, com ou sem personalidade jurídica, sem fins lucrativos*” [12].

Acerca das funções que um museu desempenha, Philip Ward escreveu em 1986: “Por definição, os museus têm quatro funções clássicas: colecionam, preservam, estudam e apresentam ou interpretam as suas colecções para o público à luz da investigação que realizam. Preservar é a mais fundamental destas responsabilidades, dado que, sem ela, a investigação e apresentação não são possíveis e a colecção perde sentido. Conservação é a tecnologia que torna a preservação possível” [13].

No contexto, torna-se necessário distinguir preservação e conservação. De acordo com Luís Casanovas preservar significa evitar que algum “objecto” sofra dano, protegendo-o de um eventual agressor [14]. Desta forma, mantêm-se as suas propriedades ou qualidades. O mesmo autor define conservação como um meio para atingir a preservação, podendo ser dividida em conservação

preventiva e conservação curativa. A primeira actua sobre as causas da degradação, enquanto a segunda trata os efeitos da degradação. A conservação preventiva, como a própria designação sugere, tem como objectivo prevenir e retardar a degradação dos objectos, controlando e actuando sobre as fontes que possam provocar essa degradação. A conservação curativa pode ser entendida como um conjunto de intervenções em objectos que se encontram em estado de degradação.

Os museus têm, assim, o dever de conservar todos os bens culturais neles incorporados, bem como garantir as condições adequadas e promover as medidas preventivas necessárias à conservação desses bens [12].

4.2. Evolução das exigências higrotérmicas em museus

É importante reflectir sobre as origens da conservação preventiva e sobre o início da percepção de que determinados níveis de temperatura e humidade relativa aceleram a degradação dos materiais.

Os primeiros vestígios das preocupações com as condições climáticas remontam à Antiguidade. Nos seus livros, Marcus Vitruvius Pollio (século I a.C.) recomenda que para manter as paredes secas, estas deviam ser drenadas, recorrendo, se necessário, a valas com cascalho e restos de carvão, de modo a diminuir a ascensão de água por capilaridade. Já nesta altura era possível observar a existência de alguma preocupação para com as condições ambiente, principalmente associada ao conceito de salubridade [14].

Recordemos Leonardo Da Vinci (1452-1519), artista e cientista que dedicou muito tempo ao estudo da atmosfera. Para medir a humidade atmosférica, Leonardo Da Vinci inventou o higrómetro. Este instrumento assemelhava-se a uma balança, sendo composto por dois pratos. Num dos pratos era colocado um material higroscópico (algodão) e no outro um material não higroscópico (bola de cera), ambos com uma massa inicial igual. A balança encontrava-se em equilíbrio quando o ar estava seco, mas à medida que a humidade do ar aumentava, o algodão adsorvia essa humidade e fazia com que a balança tendesse para o seu lado. Tal desequilíbrio da balança, causado pela diferença de massa, indicava o nível de humidade. Este mecanismo permitiu um forte avanço para o conhecimento da qualidade do ar, possibilitando efectuar previsões de pluviosidade, por exemplo [15].

Considere-se o caso do Ashmolean Museum de Oxford, criado em 1683. Nas instruções dadas por Elias Ashmolean a Thomas Wood, arquitecto encarregue pela construção do museu, é possível encontrar as primeiras manifestações da preocupação com o meio museológico. Ashmolean propôs a construção de algumas salas de grandes dimensões com a presença de lareiras para garantir a sua ventilação. Contudo, neste período as preocupações com as condições ambiente não iam muito além da noção de salubridade, encarada ainda de uma forma generalista [14].

Até aos primórdios do século XIX as condições ambiente eram definidas através de uma avaliação sensorial, ou seja, pela análise dos efeitos visíveis sobre os objectos, tomando como referência alguns comportamentos fáceis de identificar e que serviam de orientação, como por exemplo as gavetas de móveis, que se abrem mais facilmente em tempo seco, ou as gravuras sobre o papel, onde aparecem os primeiros sinais de excesso de humidade [14].

Na segunda metade do século XIX, com o objectivo de assegurar o conforto dos visitantes, começou-se a instalar dispositivos de aquecimento em museus. Considerava-se que a definição das condições ambiente do espaço não era influenciada pelos objectos que nele se encontravam e que o edifício apenas desempenhava o papel de invólucro de protecção. Esta maneira enferma de actuar, que

perdurara até à década de 70 do século XX, estava assente em três erros fundamentais: considerar que os objectos não têm qualquer influência na definição das condições ambiente do espaço onde se encontram, o papel do edifício se limita apenas ao de simples invólucro de protecção e os valores de temperatura e humidade relativa ambiente são dados fixos e universais [14] [15].

Em 1908 foi instalado um sistema de aquecimento central com humedificação no Boston Museum of Fine Arts. Após um período experimental de dois anos foi possível verificar que o melhor valor de humidade relativa para pinturas e outras obras de arte estaria entre os 55 e 60 %. McCabe, responsável pelo relatório, não forneceu quaisquer informações acerca de testes ou resultados que levaram à definição desta gama de valores. Contudo, tais valores aparecem frequentemente em recomendações posteriores, revelando-se bastante influentes no desenvolvimento do controlo ambiental em museus. Trata-se da primeira especificação numérica para humidade em museus de que há registo. Os valores de temperatura recomendados variavam bastante, mas encontrava-se numa gama de valores mais baixa do que a considerada nos dias de hoje. Os valores eram muitas vezes determinados pela capacidade do sistema de aquecimento, mas era obrigatório que estivessem dentro da zona de conforto humano. O desenvolvimento de melhores sistemas de ar condicionado levou à sua instalação em alguns museus nos Estados Unidos da América, nomeadamente no National Archives and the Library of Congress em 1941 [16] [17].

Em 1936, Coremans (responsável pelo Central Laboratory of Belgian National Museums) refere, num artigo, de forma inequívoca que várias experiências levadas a cabo em diversos lugares mostram que os valores de temperatura e humidade relativa ideais são muito próximos de 60 °F (16 °C) e 60 %, respectivamente. Não são descritas tais experiências, porém é revelado que o controlo a 16 °C de temperatura e 60 % de humidade relativa não era viável nos museus europeus durante o Verão. Contudo, a convicção de 60 °F e 60 % como ambiente “ideal” tornara-se dominante na literatura europeia durante os anos seguintes. Rawlins, em 1942, reforçou esta ideia ao publicar um trabalho onde referiu que devido ao facto da humidade relativa ser o parâmetro mais importante e pela possibilidade dos materiais poderem ser de diferentes naturezas é impossível a definição de um valor óptimo de temperatura que seja aplicado em qualquer circunstância. A temperatura deve ser aquela que mantém uma humidade relativa dentro dos limites seguros para o material, mencionando contudo que de forma a simplificar a definição dos valores a usar podem-se considerar os valores de 60 °F (16 °C) e 60 % para a maioria dos objectos [17] [18].

Com a eclosão da Segunda Guerra Mundial, as peças que compunham a colecção da National Gallery of London foram evacuadas e armazenadas na pedreira de ardósias de Manod, no País de Gales. A pedreira era capaz de manter uma temperatura constante de 47 °F (8 °C) e uma humidade relativa que variava de 95 a 100 %. Para abrigar as pinturas foram construídos abrigos de tijolo que posteriormente foram aquecidos de forma a manter a temperatura a 63 °F (17 °C) e a humidade relativa a 58 %. As obras de arte sobreviveram à guerra em muito bom estado. No entanto, quando a guerra terminou e os artefactos que constituíam a colecção foram devolvidos ao ambiente descontrolado da National Gallery foram detectados vários danos. Esta experiência de armazenamento na pedreira com clima controlado revelou-se bastante positiva [17].

Em 1949, no congresso da American Association of Museums, em Chicago, George Stout defendeu a “conservação de longo alcance” e mostrou uma igual preocupação com os objectos em bom e mau estado. Alertou ainda para a impossibilidade de quantificar o custo da negligência face aos cuidados e protecção constantes, referindo que o cuidado contínuo economiza dinheiro e mantém a integridade dos objectos. Stout sublinhou que os cuidados para com uma colecção não se prendem apenas com

reparações ocasionais, sendo necessário melhorar o conhecimento sobre o verdadeiro estado do objecto que está sujeito à degradação para que se consiga manter esse estado [19].

Em 1960, Harold Plenderleith e Paul Philippot publicaram os resultados de uma pesquisa da International Council of Museums – ICOM - realizada em 1955 e que incidiu sobre os efeitos do clima na conservação dos objectos museológicos. O relatório “Climatology and Conservation in Museums” considerou os valores de Hr entre 50 e 60 % como uma zona de segurança, referindo que não devem ocorrer flutuações repentinas de Hr. Os autores afirmaram que a segurança de um objecto depende da sua história e das condições para as quais se aclimatizou, pois mesmo as melhores condições em museus podem ser perigosas por exemplo para um painel pintado que tenha permanecido por vários anos em clima frio e húmido [19].

Em 1967 decorreu em Londres a primeira conferência organizada pelo International Institute of Conservation (IIC) sobre climatologia em museus. No prefácio da publicação o conceito de conservação preventiva é definido como o estudo da influência do ambiente de um museu sobre os objectos nele inseridos e a atenuação dos efeitos dos processos de envelhecimento, afirmando que à semelhança da medicina, mais do que a cura, o principal objectivo é a prevenção da doença [19].

Em 1978 foi publicada a primeira edição do livro de Garry Thomson - “The Museum Environment”. Thomson abordou o tema de uma forma diferente do considerado até então, dando prioridade às colecções em detrimento do conforto dos visitantes, ordenando as características do meio ambiente a partir de um conjunto de factores que nunca tinham sido considerados em conjunto: a luz, a poluição, a humidade relativa e a temperatura. Thomson, conselheiro científico da National Gallery of London, afirmara que o controlo da humidade relativa num museu é muito mais importante do que o controlo da temperatura [14].

Anos mais tarde, em 1986, foi publicada a segunda edição do livro “The Museum Environment”. Thomson introduziu ligeiras alterações no que diz respeito à discussão da humidade relativa e foram estabelecidas duas classes para a temperatura e humidade relativa de museus (Tabela 4.1). A Classe 1 é adequada aos grandes museus nacionais, antigos ou novos, e a todos os novos edifícios de museus importantes. Por sua vez, a Classe 2 tinha o objectivo de evitar os grandes perigos, mantendo os custos e alterando o mínimo possível a envolvente do edifício, aplicável por exemplo para controlo do clima de edifícios históricos e igrejas. Thomson definiu também uma gama de valores médios para diferentes climas e tipos de objectos (Tabela 4.2) [17].

Tabela 4.1: Classes de temperatura e humidade relativa de Thomson (adaptado de [20]).

Temperatura [°C]		Humidade relativa [%]	
Inverno: 19 ± 1 °C Verão: 24 ± 1 °C	(1) (2)	50 ± 5 % ou 55 ± 5 %	(3) Classe 1
Razoavelmente constante para estabilizar a humidade relativa		40 a 70 %	Classe 2

(1) A temperatura deve ser definida de modo a controlar a humidade relativa, mas o nível é o ditado pelo conforto humano. São sugeridos diferentes valores para o Inverno e para o Verão por questões de economia de energia.

(2) Nas zonas de armazenamento ou em edifícios fechados ao público durante a estação de Inverno admite-se que os valores de temperatura possam ser mais baixos, mas não inferiores a valores que possam possibilitar a ocorrência de condensações - é sugerido o limite inferior de 10 °C.

(3) O nível fixado pode ser maior ou menor, mas para colecções mistas deve estar no intervalo 45-60 %. Objectos especiais podem requerer condições especiais.

Tabela 4.2: Valores médios da humidade relativa de acordo com o clima (adaptado de [21]).

65 %	<ul style="list-style-type: none"> • Aceitável para colecções mistas, nas regiões húmidas dos trópicos; • Tem como objectivo assegurar a estabilidade do aço e do bronze que contêm cloretos; • A circulação de ar é muito importante.
55 %	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Valor recomendado para pinturas, mobiliário e esculturas em madeira na Europa. Satisfatório para colecções mistas; ▪ Pode causar condensações com temperaturas muito baixas em edifícios antigos, especialmente nas zonas do interior da Europa e na América Nordeste.
45-50 %	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Compromisso para colecções mistas e quando há riscos de condensação; ▪ Podem ser os valores mais indicados para têxteis e papéis expostos à luz.
40-45 %	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Valores aconselhados para colecções que integram unicamente objectos metálicos; ▪ Aceitável em museus das zonas áridas com exposições de materiais locais.

Nota: Exposições internacionais e empréstimos requerem aprovação internacional dos valores de humidade relativa que tendem para valores médios entre os 50 e 55 %.

Entre 1979 e 1999 foi possível concluir através de diversos estudos que a temperatura e humidade relativa “óptimas” devem ser definidas em função da colecção. Os valores de temperatura têm sido ditados pelo conforto humano e o facto de se exigirem flutuações estreitas e, por isso, dispendiosas foi bastante criticado. Nos anos que antecederam o Congresso de Otava (1994), os valores de temperatura e humidade relativa foram definidos pela maior parte das instituições privadas ou públicas de maneira um tanto ou quanto arbitrária e tidos como válidos para qualquer museu, independentemente da sua localização e clima histórico a que as colecções sobreviveram [18].

Em 1993 Stefan Michalski publicou um trabalho onde mencionou que, no geral, o elevado risco começa para além do intervalo de 25 % e 75 % de humidade relativa e refere diversos tipos de degradação provocadas por valores incorrectos deste parâmetro em diferentes materiais [22]. Na Tabela 4.3

encontra-se um resumo das conclusões deste trabalho acerca do ambiente interior dos museus. A abordagem não procura um valor ideal de temperatura e humidade relativa para qualquer colecção. Ao invés disso são estabelecidos valores mínimos e máximos admissíveis e flutuações toleráveis de forma a minimizar o risco de degradação. Os valores de temperatura e humidade relativa não devem ser nem muito elevados, nem muito baixos e as flutuações destes parâmetros em torno do valor médio dependem não só do tipo de material mas também do risco que se está disposto a correr. Foram também apresentados os vários tipos de degradação a que os objectos museológicos estão sujeitos quando expostos a valores incorrectos.

Em 1994, no Congresso de Otava do Instituto Internacional de Conservação, David Erhardt e Marion Mecklenburg concluíram que não existe um valor ideal de humidade relativa para museus, mas que apenas existem valores e intervalos que minimizam tipos de alterações particulares em objectos. Adicionalmente referem que devem ser evitados valores extremos e rápidos ou grandes variações de humidade relativa. Dentro de um intervalo de valores ponderado (30-60 %), o valor mais elevado tende a minimizar os danos físicos, enquanto o mais reduzido tende a minimizar as reacções químicas [18]. Relativamente à temperatura, os dois investigadores concluíram que o intervalo para esse parâmetro adaptado aos museus deve corresponder aos valores determinados pelo conforto humano, excepto para casos especiais de armazenamento a longo prazo [14].

No mesmo ano, o National Trust recomendou uma nova estratégia que envolvia o controlo da humidade relativa a um nível tão constante quanto possível e obtida preferencialmente através do ajuste da temperatura. De acordo com esta estratégia a humidade relativa é a variável de controlo prioritário e deve ser mantida a um valor constante de 58 %. Relativamente à temperatura, esta não deve ser inferior a 5 °C nem superior a 22 °C [20].

Em 1998, Dario Camuffo publicou a primeira edição do livro “Microclimate for Cultural Heritage” onde abordou os efeitos da variabilidade do microclima interior nos edifícios, monumentos e outros objectos culturais. A primeira parte deste livro é dedicada à teoria aplicada e é apresentado um levantamento sobre os conceitos básicos de termodinâmica clássica, cinética e estatísticas que são necessários para o diagnóstico e conservação. A segunda parte é dedicada à utilização prática, mostrando como as medições devem ser realizadas e indica alguns erros comuns que devem ser evitados [2]. A equipa liderada por Dario Camuffo realizou vários estudos importantes na primeira década deste milénio, de onde se destacam os estudos realizados em Itália, Áustria, Bélgica e Reino Unido [23] [24] [25].

Em 1999 foi publicada a norma italiana UNI 10829 [26], que surge após o paradigma ter sofrido importantes alterações. Tendo sempre presente a preocupação de garantir a correcta conservação dos materiais, abandonou-se busca por um valor único, procurando-se intervalos sustentáveis com base em estudos laboratoriais. Nesse sentido, foram definidos valores com o objectivo de limitar as variações sazonais e os ciclos diários (Tabela 4.4). É de referir que os valores indicados devem ser vistos como valores indicativos [1] [26].

Tabela 4.3: Efeitos dos valores incorrectos de humidade relativa e temperatura nos materiais segundo o CCI (adaptado de [27]).

	Materiais orgânicos rígidos ou quebradiços ⁽¹⁾	Materiais orgânicos flexíveis, quimicamente estáveis ⁽²⁾	Materiais orgânicos flexíveis, quimicamente autodestrutivos ⁽³⁾	Materiais inorgânicos ⁽⁴⁾
Temperatura muito alta	Acima de 30 °C: enfraquecimento de alguns adesivos e ceras	Acima de 30 °C: enfraquecimento de alguns adesivos e ceras	Desintegração e amarelecimento. Se a vida do objecto é de 50 anos: 20 °C; Se é mais de 200 anos: 10 °C; Se é de 5000 anos: -10 °C	Alguns minerais desintegram-se
Temperatura muito baixa	Fragilização, por exemplo dos acrílicos abaixo de 5 °C	Fragilização	Fragilização	
Flutuações de temperatura	Taxa de evolução ou risco de fractura: ±10 °C e ±20 °C: P, V, A: quase nenhum; ±40 °C: P, V, A, W: pouco grave; Efeitos indirectos se houver flutuações de Hr	Se a imagem tiver camada frágil ou se estiver contida numa moldura		Alguns compostos, por exemplo o esmalte fraco
Húmido (Hr > 75 %)	Bolores; Enfraquecimento da cola em algumas pinturas de madeira; Tela pode retrair	Bolores; Redução de tamanho e enfraquecimento de ligantes; Produtos têxteis podem retrair	Bolores; Redução de tamanho e enfraquecimento de ligantes	Bolores; Rápida corrosão de objectos à base de metais
Acima ou abaixo da Hr crítica				Para alguns: corrosão e desintegração
Acima dos 0 % de Hr			Desintegração e amarelecimento; Se a vida útil é de 50 anos: 50 %; Se é de 100 anos: 30 %; Se é de 200 a 400 anos: 10 %	
Flutuações em torno da Hr média (sem tensões)	Taxa de evolução ou risco de fractura: ± 5 %: P, V, A, W nenhum; ± 10 %: P: reduzido; W, A: quase nenhum; ±20 %: P: pequeno; W,A: quase reduzido; ±40 %: P: grave; W, A: pouco grave	Se a imagem tiver camada frágil ou se estiver contida numa moldura	Se a imagem tiver camada frágil ou se estiver contida numa moldura	Flutuações que ultrapassam a Hr crítica algumas cerâmicas contaminadas, pedras e platinas começam a se desintegrar

(1) Por exemplo: madeira (W), pinturas a óleo (P), verniz (V), pinturas em acrílico (A)

(2) Por exemplo: papel não ácido e têxteis, pergaminhos, fotografias a preto e branco estáveis

(3) Por exemplo: papel ácido, filmes de acetato, fotografias coloridas

(4) Por exemplo: metais, minerais, cerâmicas, vidro.

Tabela 4.4: Intervalos ideais e ciclos diários de temperatura e humidade relativa segundo a norma UNI 10829 (adaptado de [26]).

Material	t [°C]	Δt [°C]	Hr [%]	ΔHr [%]
Artefactos de cartão	18 a 22	1,5	40 a 55	6
Tecidos, cortinas, tapetes, trajes religiosos, materiais feitos com fibras naturais	19 a 24	1,5	30 a 50	6
Roupas e artefactos em couro	19 a 24	1,5	45 a 60	6
Pinturas em tela, pinturas a óleo, têmpera e guache	19 a 24	1,5	40 a 55	6
Arquivos em papel ou pergaminho, papiros, manuscritos, livros impressos, colecções de selos	13 a 18	1,5	50 a 60	5
Encadernações em couro ou pergaminho	19 a 24	1,5	45 a 55	6
Esculturas policromadas de madeira, madeira pintada, relógios de madeira, instrumentos musicais de madeira	19 a 24	1,5	50 a 60	4
Esculturas de madeira sem pintura, cestaria e painéis de madeira	19 a 24	1,5	45 a 60	4
Pedra, rochas e minerais	19 a 24	-	40 a 60	6
Pinturas murais, frescos	10 a 24	-	55 a 65	-
Marfim, chifres, colecções de conchas, ossos	19 a 24	1,5	40 a 60	6

No mesmo ano foi publicado um capítulo no manual da American Society of Heating and Air-Conditioning Engineers, Inc – ASHRAE, dedicado a museus, bibliotecas e arquivos. Este capítulo passou a fazer parte das versões posteriores desse manual, nomeadamente em 2003, 2007 e 2011. Esta especificação define diversas classes climáticas de modo a limitar os riscos de degradação dos materiais, focando-se nos danos mecânicos, biológicos e químicos. Constituiu uma grande mudança face ao passado, uma vez que possibilita a existência de faixas menos restritas e apresenta diferentes especificações consoante as exigências das próprias colecções e limitações dos edifícios. A Tabela 4.5 apresenta as várias classes e respectivos limites de temperatura e humidade relativa de acordo com o grau de exigência das colecções. A especificação pode ser aplicada tanto em projecto, quando se pretende definir as condições de clima interior (intervalos ideais), como também na classificação microclimática de museus em serviço, como mais tarde se veio a observar em vários trabalhos científicos [7] [18] [28]. Para além disso, a especificação apresenta ainda uma outra tabela que relaciona o tipo de edifício, uso e envolvente com a classe que se conseguirá alcançar, como se pode ver na Tabela 4.6.

No ano de 2006, a National Trust alterou a especificação estabelecida em 1994 para a humidade relativa. Em vez do valor único de 58 %, alterou o seu “*set-point*” para um intervalo de valores entre 50 e 65 %. O valor da humidade relativa deve ser ajustável em cada compartimento e depende das condições a que a colecção se encontra ambientada. As especificações para a temperatura não sofreram alterações, não devendo ser inferior a 5 °C, nem superior a 22 °C [20].

Tabela 4.5: Classes climáticas para museus, galerias, arquivos e livrarias segundo a ASHRAE (adaptado de [29]).

Valor ideal	Ciclos sazonais	Flutuações de curta duração	Observações
t _{média anual} : 15 °C a 25 °C; Hr: 50 % ou média anual para exposições permanentes	t: ±5 °C; Hr: Sem variação	t: ±2 °C; Hr: ±5 %	<u>Classe AA</u> : Sem risco de danos para a maioria dos artefactos e pinturas
	<u>As</u> : t: +5 °C; -10 °C; Hr: ±10%	t: ±2 °C; Hr: ±5 %	<u>Classe A</u> : Risco reduzido de danos mecânicos para os artefactos de alta vulnerabilidade; nenhum risco mecânico para a maioria dos artefactos e pinturas
	<u>A</u> : t: +5 °C; -10 °C; Hr: Sem variação	t: ±2 °C; Hr: ±10 %	
	t: +10 °C; <30 °C; Hr: ±10 %	t: ±5 °C; Hr: ±10 %	<u>Classe B</u> : Risco moderado de danos mecânicos para os artefactos de alta vulnerabilidade; pequeno risco para a maioria das pinturas
	t raramente > 30 °C; Geralmente < 25 °C; Hr: 25 a 75 %		<u>Classe C</u> : Alto risco de danos mecânicos nos artefactos de alta vulnerabilidade; risco moderado para a maioria das pinturas
	Hr: < 75 %		<u>Classe D</u> : Alto risco de danos mecânicos imediatos ou cumulativos para a maioria dos artefactos e pinturas

No mesmo ano, em Portugal, na sua tese de doutoramento intitulada “Conservação Preventiva e Preservação das Obras de Arte: condições-ambiente e espaços museológicos em Portugal”, Luís Casanovas considerou que as obras de arte são sensíveis às variações do meio envolvente. Como tal, deve ter-se em atenção as características específicas dos edifícios, do clima e das colecções. Neste trabalho, o autor partiu do estudo das condições do meio ambiente de alguns museus de referência com o objectivo de encontrar comportamentos e valores normativos indispensáveis para qualquer intervenção. Este documento constituiu um grande contributo para o estudo das condições ambiente das obras de arte [18].

Em 2007, Stefan Michalski participou numa reunião organizada pelo Getty Conservation Institute onde colocou em discussão um artigo escrito por si. Neste artigo, Michalski abordou, entre outros assuntos, um conceito passível de ser aplicado para definir as condições ambiente de museus. Este conceito, conhecido por “*proofed fluctuations*”, consiste em definir as flutuações mais elevadas de temperatura e humidade relativa (flutuações confirmadas) a que uma colecção já esteve sujeita no passado e respeitar esse intervalo como garantia do futuro das colecções e objectos. Michalski refere que se as flutuações passadas não causaram fracturas e a resistência do material não se alterou significativamente, não há razão para esperar que no futuro ocorram fracturas em resposta às mesmas flutuações, ou seja, se as condições climáticas futuras não excederem o intervalo definido pelas condições passadas, então o risco de futuros danos mecânicos é desprezável [30].

Tabela 4.6: Classificação de potencial climatização em edifícios (adaptado de [29]).

Categoria de controlo	Classe do edifício	Construção: Tipo do edifício	Tipos de edifícios mais frequentes	Uso típico do edifício	Sistema utilizado	Limite prático de climatização	Possível classe de controlo
Não controlado	I	Estrutura aberta	WCs (exterior das casas), arrecadações/arrumos, pontes, serrações (onde os troncos de madeira são cortados), poços	Sem ocupação, aberto todo o ano para os visitantes	Sem sistema	Sim limite	D (se o clima é favorável)
	II	Sistema de pilares e vigas (em madeira)	Cabins (casas típicas de Inglaterra), celeiros, ateliers/arrecadações, silos, fábricas de gelo (ou casas de gelo)	Sem ocupação; Acesso pontual	Exaustores, janelas abertas, ventiladores auxiliares, ventilação pelo sótão; Sem aquecimento	Ventilação	C (se o clima é favorável) D (a menos que seja húmido)
Controlo parcial	III	Alvenaria sem IT; Paredes em madeira; Janelas de vidro simples	Garagens de barcos e comboios, faróis, casas em madeira áspera, forjas/fundições	Visitas no Verão; Fechado ao público no Inverno; Não ocupado	Aquecimento de baixo nível, ventilação no verão e controlo de calor com humedecimento no inverno	Aquecimento, ventilação	C (se o clima é favorável) D (a menos que o clima seja quente e húmido)
	IV	Alvenaria pesada ou paredes compostas com gesso; Janelas suplementares (são construídas por fora ou por dentro das já existentes para melhorar a característica térmica, muito comum em França)	Casas, igrejas, capelas, lojas, hotéis, alguns edifícios de escritórios	Funcionários em salas isoladas, loja de presentes; Visitantes apenas de passagem; Ocupação limitada; Sem uso no Inverno	Aquecimento canalizado de baixo nível, arrefecimento de verão com sistema on/off, arrefecimento por expansão directa, algum sistema de controlo de humidade; Capacidade de reaquecimento	Sistema AVAC básico	B (se o clima é favorável) C (se o Inverno é ameno) D
Clima controlado	V	Estruturas com isolamento térmico, vidros duplos, retardador de vapor (com barreira para vapor), portas duplas	Museus intencionais (construídos para esse fim) bibliotecas de pesquisa, galerias (de arte), exposições, salas de armazenamento	Grupos de escolas; Instalações abertas ao público; Ocupação ilimitada	Aquecimento, arrefecimento, reaquecimento e humidade canalizados, controlados por intervalos de valores	Controlo de temperatura	AA (se o Inverno é ameno) A B
	VI	Construção de paredes de metal, salas interiores com paredes impermeabilizadas e ocupação	Abobadas, salas de armazenamento, coberturas	Sem ocupação. Visitas por marcação	Controlo especial de aquecimento, arrefecimento e humidade com estabilização precisa	Ambientes constantes especiais	AA A Fresco Seco

Inserido na colecção “Temas de Museologia”, surgiu em Portugal, no ano de 2007, o Plano de Conservação Preventiva consignado pela Lei-Quadro dos Museus. O Plano surgiu como resposta à falta de normas escritas que definissem e orientassem os princípios e as prioridades da conservação preventiva. Fazem parte desta publicação as orientações e as boas práticas a adoptar na monitorização e controlo ambiental e tem como objectivo providenciar condições para evitar valores extremos e oscilações rápidas tanto de temperatura como de humidade relativa. Para tal, incentiva-se a preferência por métodos passivos e recomenda-se o recurso a métodos activos apenas se necessário [31].

Em 2010 foi publicada a norma europeia EN 15757 – *Conservation of Cultural Property – Specifications for temperature and relative humidity to limit climate - induced mechanical damage in organic hygroscopic materials* [32]. Esta norma surge com o abandono pela busca de valores ideais e universais de temperatura e humidade relativa que eram comumente aceites como as condições ideais para a conservação, passando a usar-se uma metodologia dinâmica que permite intervalos mais flexíveis e adaptados a cada clima. Baseia-se no conceito de aclimatização, segundo o qual determinado material higroscópico quando exposto durante um longo período (mais de um ano) a condições de temperatura e humidade relativa que não as ideais para a sua conservação pode sofrer fissuração e deformações irreversíveis, acabando por sofrer um processo adaptativo e alcançar um novo equilíbrio. Depois do material se readaptar às novas condições, perdendo a sua elasticidade inicial, não deve ser exposto a uma nova alteração sob risco de perda total [32] [33].

Dada a extrema complexidade de resposta dos materiais que compõem as colecções às variações de temperatura e humidade relativa, esta norma propõe um método estatístico para definir faixas sustentáveis de temperatura e humidade relativa baseado no microclima histórico de modo a que possam conduzir a especificações gerais para limitar os danos físicos induzidos pelo clima nos materiais orgânicos higroscópicos. Esta abordagem permite intervalos mais flexíveis de temperatura e humidade relativa do que os valores-alvo individuais que são comumente aceites como condições ideais para a preservação dos bens culturais, permitindo uma redução no controlo ambiental necessário para assegurar uma boa preservação de objectos [32]. Na Tabela 4.7 é possível observar as especificações estabelecidas pela EN 15757.

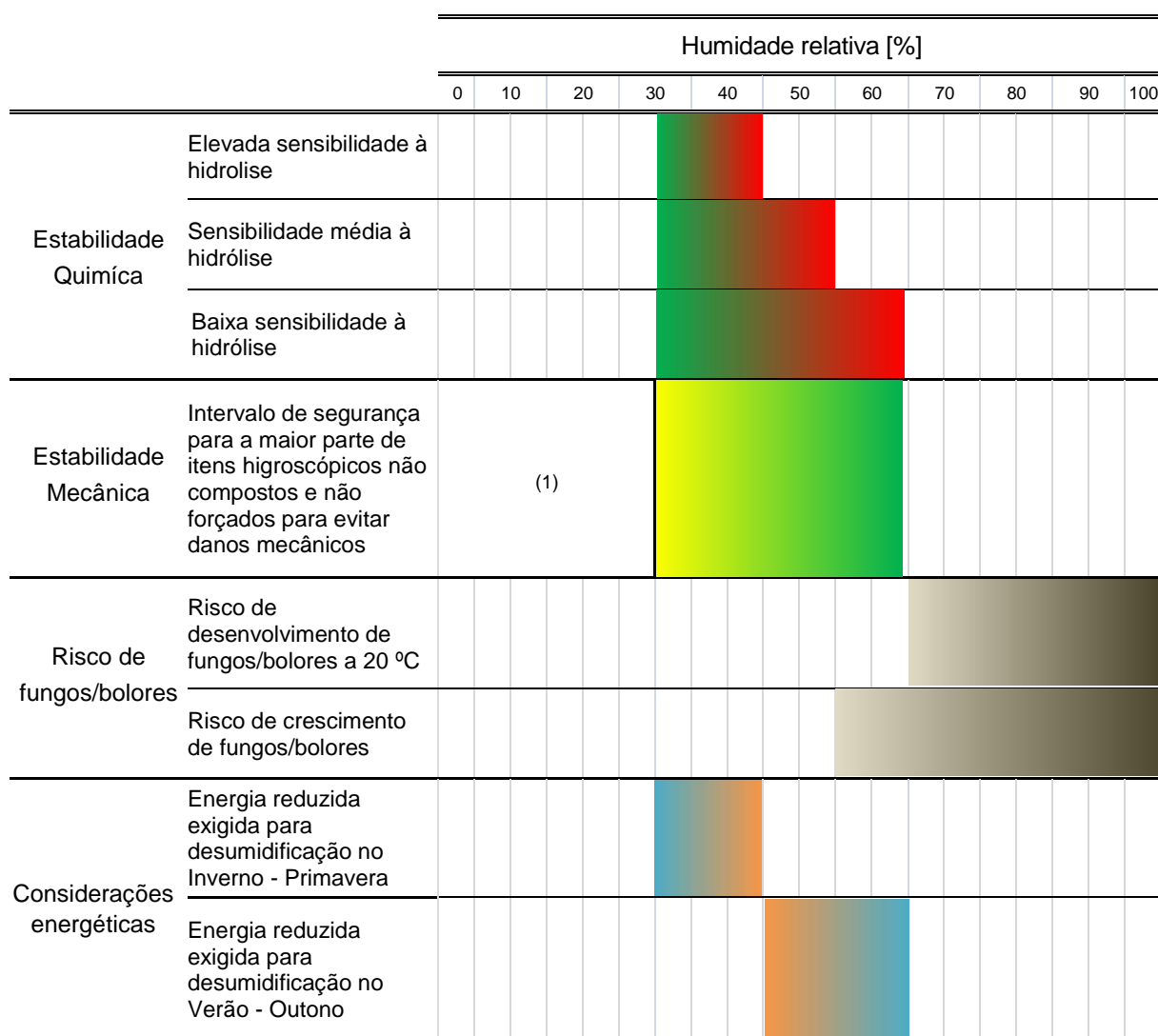
Tabela 4.7: Especificações estabelecidas pela EN 15757 (adaptado de [32]).

Valor ideal	Ciclos sazonais	Flutuações de curta duração	Observações
t: Sem especificação;	Ciclos sazonais históricos ⁽¹⁾	t: Sem especificação; Hr: $\pm 10\%$ ou o intervalo alvo calculado a partir do clima histórico ⁽²⁾ (maior valor)	⁽¹⁾ Este ciclo é obtido pelo cálculo, para cada leitura de humidade relativa, da média móvel com leituras de 15 dias antes e após o momento em que a média é calculada (média móvel a 30 dias, centrada no valor desejado). ⁽²⁾ Os limites superiores e inferiores do intervalo de Hr são determinados com 7 ^o e 93 ^o percentis das variações registadas durante o período de monitorização. As flutuações de curta duração são calculadas a partir da média móvel, correspondem à diferença entre o valor medido e o valor da média móvel.

Na Tabela 4.8 a gradação de cores de azul para vermelho indica o aumento do nível de risco de desenvolvimento de reacções químicas. Relativamente às condições energéticas, a cor azul indica uma menor exigência energética, enquanto a cor laranja indica uma maior exigência. A faixa de conforto humano situa-se entre 18 e 25 °C, enquanto o limite inferior para ocupação humana no local de trabalho é de 16 °C. O valor de precaução para evitar que a água congele nas tubagens é de 5 °C [34].

Na Tabela 4.9, as áreas ilustradas a verde indicam os intervalos onde a degradação química por humidade é retardada. Pelo contrário, as áreas a vermelho indicam os intervalos onde a degradação química é acelerada. Em relação à estabilidade mecânica a área a amarelo indica o intervalo dentro do qual o dano físico é maior. A gradação de cinza indica o aumento do risco de crescimento de fungos e tempos de germinação mais rápidos. No que diz respeito às condições energéticas, a cor azul indica uma menor exigência energética e a cor laranja indica uma exigência mais elevada.

Tabela 4.9: Risco de deterioração devido à acção da humidade relativa (adaptado de [34]).



(1) Os materiais orgânicos podem tornar-se menos flexíveis, aumentando o risco de danificação por utilização indevida.

Em 2014, Hugo Silva e Fernando Henriques desenvolveram uma nova metodologia designada como FCT-UNL. Esta metodologia tem como principal objectivo a análise microclimática de edifícios históricos

em climas temperados e surgiu após os autores verificarem que a norma EN 15757 poderia ser demasiado exigente quando aplicada em climas temperados. Nesse sentido, procurou-se definir uma metodologia dinâmica adaptada a este tipo de clima, baseada na norma EN 15757 e influenciada pela norma italiana UNI 10829 e pelas especificações preconizadas pela ASHRAE [33].

Esta metodologia apresenta duas classes que limitam de maneira diferente as flutuações sazonais e flutuações de curta duração e propõe uma análise dos registos de temperatura e humidade relativa de modo a definir uma faixa sustentável. A Classe 1, com limites mais exigentes, procura minimizar o risco de danos mecânicos e ataques biológicos e é aplicável a edifícios com requisitos elevados como é o caso dos museus. A Classe 2, mais permissiva, considera o risco de danos mecânicos moderado e o risco de ataques biológicos menos importante do que o exigido pela Classe 1 e é adequada para igrejas, por exemplo. Na Tabela 4.10 apresenta-se uma descrição desta metodologia [33].

Tabela 4.10: Metodologia de análise microclimática (FCT-UNL) e definição de limites sustentáveis de temperatura e humidade relativa para edifícios localizados em climas temperados (adaptado de [33]).

Valor de referência	Ciclos diários ⁽¹⁾	Ciclos sazonais sustentáveis ⁽²⁾	Flutuações de curta duração ⁽³⁾	Limites extra	Observações
t e Hr: média anual	90 ^o percentil ($\Delta t \cap \Delta Hr$) ≥ Limites UNI 10829	t e Hr: -10 ^o /+90 ^o percentis	t e Hr: -5 ^o /+95 ^o percentis	$ Hr - \overline{Hr} \leq 15 \%$ $Hr_{max} \leq 75 \%$ $ t - \bar{t} $ até 10 °C, mas não acima de 30 °C	Classe 1 – Risco reduzido de dano mecânico e ataque biológico. Aplicável em edifícios com exigências especiais onde os materiais exijam um controlo apertado, como museus, ou outros edifícios com exposições permanentes importantes.
		t e Hr: -10 ^o /+90 ^o percentis	t e Hr: -5 ^o /+95 ^o percentis	-	Classe 2 – Risco moderado de dano mecânico. Aplicável quando o risco biológico não é um factor preponderante e quando não é exigido um clima tão constante como aquele definido na classe 1. Exemplo das igrejas

(1) Valores definidos pelo 90^o percentil dos ciclos diários registados, se maior que os limites definidos pela norma italiana UNI 10829;

(2) Este ciclo é obtido pelo cálculo de uma média móvel a 30 dias, centrada na data desejada. A sua variação é observada em torno da média anual;

(3) A faixa alvo é calculada a partir do clima histórico. Os limites inferior e superior do intervalo são determinados com base no 5^o e 95^o percentis das flutuações de curto prazo recolhidos durante o período de monitorização. As flutuações de curto prazo são definidas pela diferença entre o valor registado e o valor correspondente do ciclo sazonal sustentável para esse ponto.

Posteriormente, Hugo Silva e Fernando Henriques procuraram comparar a aplicação da metodologia por eles desenvolvida com a metodologia definida na EN 15757, avaliando os resultados de acordo com a especificação ASHRAE, de onde concluíram que apesar de menos exigente, por ser mais adaptada a climas temperados, a metodologia FCT-UNL proporciona uma faixa climática mais adequada à conservação das colecções e mais facilmente cumprida pelos edifícios [35]. Mais recentemente, em Novembro de 2015, compilaram um conjunto de métodos de análise e quantificação de risco e definiram um método de apoio à decisão que utilizaram para avaliar a imposição do set-point 20 °C – 50 % e pelos intervalos definidos pela PAS 198 e pela EN 15757 ao clima interior de uma igreja em Lisboa, avaliando a resposta do edifício e os riscos mecânico, biológico e químico associados a cada intervalo. Deste trabalho concluiu-se que o clima natural presenciado no interior de um edifício antigo em Lisboa por si só não constitui factor de risco elevado para as colecções e que a utilização de normas e especificações deve ser testada e validada antes da sua generalização [36].

4.3. Degradação dos materiais

Apesar da existência de várias especificações, normas e linhas orientadoras como se constatou no subcapítulo 4.2, é essencial compreender o efeito real da temperatura e humidade relativa na degradação dos materiais.

A temperatura e a humidade relativa são factores a ter em consideração para a conservação de obras de arte em áreas de exposição e armazenamento. As flutuações de temperatura e humidade relativa ou a sujeição dos materiais a valores constantes mas desajustados podem conduzir a três tipos de degradação [28]:

- A degradação biológica, onde se destacam os ataques fúngicos, e que ocorre quando a temperatura e humidade relativa são favoráveis ao desenvolvimento de vida biológica;
- A degradação mecânica, que está relacionada sobretudo com as flutuações de humidade relativa do ar (e da temperatura, mas em menor medida), que faz com que os materiais encolham e expandam em função do seu teor de água;
- A degradação química, que está associada à velocidade das reacções que são influenciadas pela temperatura e humidade relativa e atacam sobretudo a celulose e os vernizes.

4.3.1. Degradação biológica

A degradação biológica está directamente relacionada com o crescimento de fungos nos elementos construtivos, assume-se como uma das principais causas de degradação em museus um pouco por todo o mundo e denuncia a presença de valores elevados de humidade relativa. As formas biológicas de degradação dependem principalmente de uma interacção entre temperatura e humidade relativa, e não apenas desta última [28].

Quando se está perante temperaturas inferiores a 20 °C os processos metabólicos são reduzidos e uma escolha adequada de factores como a humidade relativa, ventilação, pH e iluminação pode evitar o aparecimento de fungos, contudo para uma gama de temperaturas entre os 20 °C e 30 °C a actividade microbiológica encontra-se favorecida, o que pode provocar efeitos nocivos em vários materiais. O desenvolvimento de microorganismos causa um impacto negativo a nível visual e cria condições para o depósito de partículas que alteram parâmetros como a capacidade de adsorção/desadsorção de vapor de água e, por conseguinte, podem alterar os processos de restabelecimento de equilíbrio higrométrico dos materiais [2].

De uma forma geral é assumido que valores abaixo dos 60 % de Hr previnem o aparecimento de fungos, enquanto valores acima dos 75 % constituem um risco real [28]. Contudo existem outros factores que contribuem para o aparecimento de fungos, tais como o tipo de material, a disponibilidade de nutrientes ou a existência de contaminação prévia.

Sedlbauer aparece como um dos autores mais citados nesta área, tendo procurado relacionar o aparecimento de fungos com a temperatura, humidade relativa, tipo de substrato e o tempo necessário para o aparecimento de fungos sob determinadas condições, uma vez que a germinação não é instantânea. Segundo o método das isopleias definido pelo autor, verifica-se que para um substrato não nutritivo num ambiente a 10 °C seria necessária uma humidade relativa de aproximadamente 85 %, enquanto para uma temperatura de 20 °C seria suficiente uma humidade relativa de 80 % [37].

4.3.2. Degradação mecânica

A humidade relativa assume um papel preponderante no que diz respeito à degradação mecânica. As suas flutuações impõem variações dimensionais nos materiais orgânicos higroscópicos e, por vezes, tensões elevadas que podem provocar fissuras e deformações permanentes no processo de adaptação às condições a que estão sujeitos.

Normalmente os maiores riscos de degradação mecânica estão associados à humidade relativa, contudo a temperatura também tem alguma influência neste processo, principalmente quando humidades relativas reduzidas se combinam com valores também reduzidos de temperatura, o que pode tornar os materiais mais quebradiços. As baixas temperaturas aumentam a fragilidade dos materiais e podem contribuir para a degradação física em alguns acrílicos e pinturas a óleo, tornando-os quebradiços [34].

Os ciclos repetidos de temperatura originam mecanismos de desgaste e potenciam a falha por fadiga em materiais sensíveis. Quanto mais rápidos estes forem, maior será a interacção entre as camadas dos artefactos e mais rápido se dará o envelhecimento das camadas superficiais que funcionam como um filtro e atenuam a passagem do gradiente de temperatura para as camadas mais profundas. Logo, as camadas superficiais, onde se encontra o verdadeiro valor dos monumentos e artefactos, são as mais afectadas. Por esta razão, considera-se que os ciclos diários de temperatura são mais importantes do que os ciclos sazonais [2].

A variação de temperatura influencia ainda as variações de humidade relativa, que por sua vez leva à variação do teor de água dos materiais. Consequentemente verificam-se alterações dimensionais (expansão e retracção) que conduzem a um aumento do nível de fragilidade verificado em materiais como o pergaminho, madeira, gesso e marfim.

As colecções de objectos que contêm madeira são as mais vulneráveis ao risco de degradação mecânica. Uma vez que os materiais higroscópicos têm capacidade de adsorver moléculas de água, o aumento da humidade relativa leva à sua dilatação, por sua vez o decréscimo deste parâmetro conduz à retracção. Tais variações causam uma deformação dos materiais e podem levar à sua fissuração ou a deformações permanentes.

O risco de danos físicos aumenta rapidamente para valores abaixo dos 25 % e acima dos 75 % de Hr. Por essa razão a humidade relativa não deve sair dessa gama. Uma redução de 5 % abaixo dos 25 % causa o dobro da resposta dimensional comparativamente a uma redução de 5 % quando a humidade relativa se situa acima dos 25 % [34].

Contudo, quando não existe qualquer restrição ao movimento, o objecto expande e retrai livremente consoante a humidade relativa aumente ou diminua, respectivamente. No entanto, as alterações dimensionais nem sempre ocorrem livremente.

Para o caso dos materiais compostos por várias camadas, como é o caso dos painéis pintados, constituídos por madeira, gesso, camada de cola animal e tinta, as alterações dimensionais podem estar impedidas pela própria constituição do objecto. A expansão e retracção dependem do tempo de resposta às mudanças de ambiente e do módulo de elasticidade dos materiais. Tempos de resposta e módulos de elasticidade diferentes entre as várias camadas podem restringir o movimento entre elas, o que pode provocar tensões muito elevadas que podem levar à rotura. O mesmo acontece quando o material se encontra limitado com outros materiais, como por exemplo quando tem uma moldura [28].

Quando os materiais têm elevadas espessuras, como é o caso das esculturas, a camada superficial reage mais rapidamente do que o núcleo às alterações de humidade relativa, originando um gradiente de teor de água entre o interior e a superfície. Por exemplo, quando um material está sujeito durante muito tempo a humidades relativas baixas e de seguida se procede um aumento de humidade relativa, o núcleo permanece com um teor de água baixo durante mais tempo e conseqüentemente em retracção, enquanto a superfície, que reage mais rapidamente, já se encontra em expansão, o que limita o movimento do objecto e provoca tensões elevadas que podem levar à rotura [28].

4.3.3. Degradação química

O risco associado à degradação química é aquele que permanece quando se controla a degradação mecânica e biológica. Se apenas a degradação química fosse tida em conta, valores baixos de temperatura e humidades relativas a rondar os 2 % seriam “ideais”, contudo esses valores entram em conflito com a capacidade higrotérmica do edifício e com a degradação mecânica [28].

Exemplos de reacções químicas são a alteração da cor e a fragilização do papel, o esmaecimento de corantes em fotografias antigas, o apodrecimento do couro e a perda de resistência dos têxteis.

Os altos valores de temperatura e humidade relativa aceleram as reacções químicas. Por exemplo, o papel torna-se quebradiço se forem rompidas em número suficiente as ligações químicas das moléculas de celulose. Apesar de a consequência estar associada à degradação mecânica, ou seja, a fragilização, a causa é uma reacção química, sendo a sua velocidade controlada pela temperatura e pela humidade relativa do ambiente [38].

As altas temperaturas são bastante prejudiciais para os objectos dos museus, uma vez que podem desencadear o desenvolvimento de reacções químicas e causar danos físicos inaceitáveis. À medida que a temperatura sobe, o desenvolvimento de reacções químicas aumenta exponencialmente, pois as moléculas movem-se mais rapidamente, colidindo e reagindo mais rapidamente entre si. Considera-se que para materiais orgânicos, para cada aumento de 5 °C, a taxa da reacção duplica. Temperaturas superiores a 30 °C podem causar distorções permanentes, alterações do brilho ou do ponto de fusão em materiais como os plásticos, ceras, resinas e vernizes. Deve ter-se especial atenção com os materiais quimicamente instáveis, ou seja, que se autodestroem, nomeadamente o papel ácido, os filmes de nitrato ou acetato e objectos de borracha, pois para estes materiais as temperaturas altas são extremamente danosas [34].

Os valores elevados de humidade relativa potenciam o risco de reacções químicas na medida em que existe mais água disponível para as reacções de hidrólise. A corrosão dos materiais, o enfraquecimento das fibras e a descoloração das fibras ficam favorecidas nestas situações [18] [38].

Apesar da dificuldade em limitar a degradação química sem afectar a degradação mecânica, deve existir um compromisso para que o risco de perda se mantenha num nível aceitável.

5. Metodologia

5.1. Considerações prévias

O presente estudo teve como objectivo analisar o comportamento microclimático interior, referente ao ano de 2014, do Museu Nacional de Arte Antiga (MNAA), avaliar as condições de conservação e testar a aplicação de uma metodologia dinâmica de definição de intervalos alvo que ambiciona ser mais tolerante do que a maioria dos valores presentes na bibliografia e ainda assim manter as condições de conservação.

5.2. O Museu

O Museu Nacional de Arte Antiga situa-se na rua das Janelas Verdes em Santos (Lisboa), próximo do Rio Tejo e da zona portuária de Alcântara, como é possível visualizar na Figura 5.1. Acolhe a mais rica colecção pública de Portugal, com uma grande variedade de pintura e escultura desde Idade Média até ao século XIX. O seu acervo é constituído também por cerâmica portuguesa e chinesa, peças da arte oriental e africana, ourivesaria, mobiliário e têxteis [39] [40].



Figura 5.1: Localização do MNAA [fonte: Google Maps – Junho 2015].

A Figura 5.2 diz respeito à fachada exterior do Museu e nas Figuras 5.3 e 5.4 é possível observar duas das obras mais emblemáticas presentes neste espaço. A primeira mostra os Painéis de São Vicente, obra datada de 1470, da autoria de Nuno Gonçalves, que assume grande importância na história da pintura europeia. A segunda, datada de 1506, mostra a Custódia de Belém – mais célebre obra da ourivesaria portuguesa - atribuída ao ourives e dramaturgo Gil Vicente e mandada lavar por D. Manuel I para o Mosteiro de Santa Maria de Belém (Jerónimos) [39].



Figura 5.2: Fachada exterior do MNAA [40].



Figura 5.3: Painéis de São Vicente.



Figura 5.4: Custódia de Belém.

5.2.1. História do Museu

O Museu Nacional de Arte Antiga (MNAA) está localizado, desde a sua fundação, num palácio mandado construir nos finais do século XVII por D. Francisco de Távora, primeiro conde de Alvor. Em 1759 o palácio foi adquirido em leilão por Paulo de Carvalho e Mendonça. Após a sua morte passou a pertencer ao seu irmão, Marquês de Pombal. Assim, o palácio ficou conhecido por Palácio de Alvor-Pombal. Anos mais tarde foi adquirido pelo Estado Português com o intuito de servir de sede ao Museu Nacional das Belas Artes e Arqueologia. Aquando da sua inauguração, em 1884, muda oficialmente a sua condição de residência palaciana para a de museu. Em 1911 o Museu mudou de nome, passando a ter a designação de Museu Nacional de Arte Antiga, que mantém até aos dias de hoje [39] [41].

O Convento de Santo Alberto, também conhecido por Convento das Albertas, estava contíguo ao palácio. Em 1890, após a morte da última freira, o estado tomou posse do Convento, entregando a sua tutela ao Museu. Dado o estado de deterioração em que o Convento se encontrava, em 1918 procedeu-se à sua demolição. Desta antiga construção resta apenas a capela que actualmente está englobada no chamado Anexo (edifício poente), mandado construir nos finais dos anos 30, onde outrora se encontrava o Convento [40] [41].

Ao longo dos anos, após a conversão do edifício em museu, foram várias as remodelações e adaptações, quase sempre com o objectivo de conquistar mais espaço. Entre 1942 e 1974 procedeu-se à construção de uma ala oriental, adaptando a sua fachada à do edifício do século XVII. Esta nova construção albergou o auditório, a biblioteca e o gabinete de desenhos e gravuras, novas salas de exposição permanente e uma galeria destinada a exposições temporárias [41].

5.2.2. Descrição geral

O MNAA possui uma planta rectangular irregular e é composto por três construções articuladas e onde se encontra a presença de três tipos distintos de arquitectura: residencial - palácio e ampliação; religiosa – a capela; e cultural - o anexo, como se pode ver na Figura 5.5) [42].



Figura 5.5: Localização dos vários corpos do edifício do MNAA, sobre pormenor de pintura de Jaime Martins Barata, 1938 [42].

A estrutura do edifício é em alvenaria mista de cantaria de calcário e tijolo com vigas de betão. As fachadas são rebocadas e pintadas de bege/amarelo e rematadas por friso, cornija e beirado. Os cunhais, os pavimentos, o embasamento, as pilastras, os frontões, a escadaria e as esculturas são em calcário lioz [42].

A fachada principal, virada a poente, pertence ao anexo e apresenta uma disposição simétrica e dois níveis que correspondem a três pisos no interior e uma cave (piso -1) ao nível da escadaria, que actualmente serve de entrada principal do Museu (Figura 5.6).

A fachada norte é composta pelas três construções - o palácio, que apresenta uma fachada simétrica com dois pisos e é onde se localiza uma das entradas que dá acesso ao Museu (Figura 5.7); a parte da capela, que é marcada pelo portal e pela parte correspondente ao anexo e que à semelhança da fachada principal apresenta dois níveis correspondentes aos três pisos e uma cave (Figura 5.8 e 5.9).



Figura 5.6: Fachada a poente – zona do anexo.



Figura 5.7: Fachada norte – zona do palácio.



Figura 5.8: Fachada norte - zona da Capela.



Figura 5.9: Fachada norte – zona do anexo.

A fachada sul é composta pelo anexo e pelo palácio. A parte referente ao anexo é semelhante à fachada oposta, mas dividida em três níveis, pois o terreno encontra-se a uma cota mais baixa (Figura 5.10). A ligação ao palácio faz-se através de uma passadiço coberto, inferiormente marcado por um arco e superiormente por uma parede envidraçada (Figura 5.11). A zona correspondente ao palácio apresenta a parte central ligeiramente avançada (Figura 5.12). A fachada posterior, virada a nascente, apresenta dois panos (Figura 5.13) [42].



Figura 5.10: Fachada sul – zona do anexo.



Figura 5.11: Fachada sul – ligação anexo/palácio.



Figura 5.12: Fachada sul- zona do palácio.



Figura 5.13: Fachada a nascente.

Interiormente, o Museu é composto por um vasto número de salas como por exemplo, salas de exposição permanente e temporária, zonas de reserva, uma biblioteca e um auditório. Em termos gerais, o Museu divide-se na zona do anexo e no palácio. O primeiro desenvolve-se em três pisos visitáveis pelo público e um piso subterrâneo destinado a reservas e interdito a visitas. O palácio apresenta dois pisos visitáveis e um outro piso que diz respeito a um restaurante. Na Figura 5.14 é possível observar as plantas de todos os pisos do Museu, bem como a designação dos espaços, que se encontram descritos na Tabela 5.1.

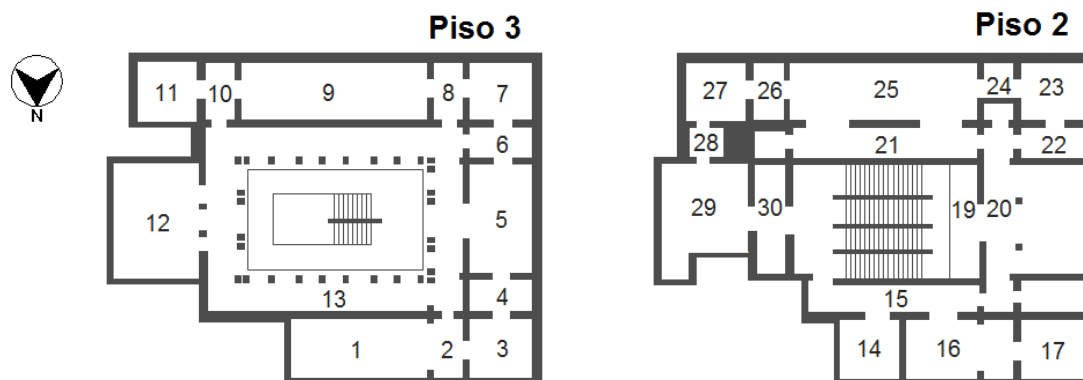


Figura 5.14: Planta de todos os pisos do MNAA.



Figura 5.14: Planta de todos os pisos do MNAA (continuação).

Tabela 5.1: Breve descrição das salas do MNAA.

Piso	Sala	Descrição
3	1 - 13	Escultura e pintura portuguesa
	14 - 18	Arte da expansão
2	19 - 25	Cerâmica
	19 - 25	Ourivesaria
	30	Joalheria
1	31,32	Capela das Albertas
	36 - 44	Mobiliário Português
	50	Sala do tecto pintado
	48-49, 55, 66-70	Artes decorativas europeias
	51 - 65	Pintura europeia
0	A	Auditório
	B	Biblioteca
	C	Gabinete de gravuras e desenhos
	D	Sala do Mezanino
	E	Galeria de exposições temporárias
-1	G	Reserva de pintura
	H	Conservação de pintura

Apresentam-se algumas fotografias do interior do museu (Figura 5.15 a 5.20).



Figura 5.15: Fotografia – "Primitivos Portugueses" (sala 13 - vista E-W).



Figura 5.16: Fotografia - uma das salas da faiança portuguesa (sala 25 - vista W-E).



Figura 5.17: Fotografia – sala "Patiño" (sala 66 - vista NE-SW).



Figura 5.18: Fotografia - Capela das Albertas (vista W-E).



Figura 5.19: Fotografia – Mobiliário Português (sala 40 - vista E-W).



Figura 5.20: Fotografia - Escadaria Nobre (situa-se junto ao gabinete de gravuras e desenhos e sala do Mezanino - vista N-S).

5.2.3. Funcionamento do museu

O MNAA recebe anualmente milhares de visitantes. Com base em dados publicados pela Direcção-Geral do Património Cultural (DGPC) foi possível apurar que o Museu Nacional de Arte Antiga foi o museu mais visitado em Portugal em 2014, com 221 mil entradas, registando um aumento de 60 % de visitas face ao ano anterior. Os dados referentes ao número de visitantes mensais são disponibilizados pela mesma fonte e apresentados na Figura 5.21 [40].

O Museu está disponível para visitas todos os dias do ano, excepto a 1 de Janeiro, Domingo de Páscoa, 1 de Maio e a 24 e 25 de Dezembro, de terça-feira a Domingo das 10 às 18 horas [39].

As salas acessíveis ao público estão equipadas com um sistema de AVAC (aquecimento, ventilação e ar condicionado) e os valores de temperatura e humidade relativa são controlados por computador. O sistema de climatização é caracterizado por quatro tubos com baterias de água quente e fria a funcionar em simultâneo. A desumidificação é realizada com as baterias quente/fria e humidificação com um sistema de ionização da água e a sua introdução na ventilação.

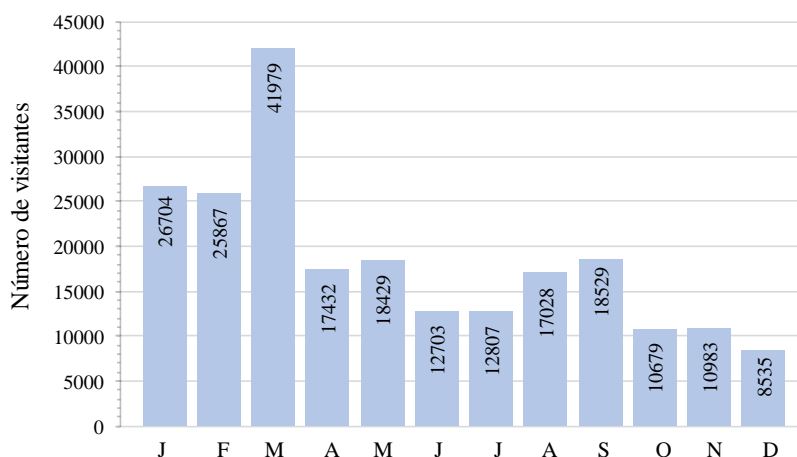


Figura 5.21: Número de visitas mensais registadas pelo Museu no ano de 2014.

5.3. Definição geral do clima de Lisboa, Portugal

Lisboa é considerada uma das cidades da Europa com o clima mais ameno. A sua latitude a Sul concede-lhe um clima semelhante aos países mediterrânicos e a proximidade com o Oceano funciona como efeito moderador impedindo o clima de ser excessivamente quente no Verão e frio no Inverno, apresentando cerca de 260 dias de sol por ano.

De acordo com a classificação de Köppen, o clima da cidade de Lisboa pode ser classificado como temperado com Verão quente e seco [43].

Segundo o Atlas Climático Ibérico a temperatura média anual de Lisboa ronda os 17 °C. Os meses mais quentes estão compreendidos entre Abril e Outubro, enquanto os mais frios entre Novembro e Março. De acordo com a normal climatológica¹ de 1971-2000 os picos máximos e mínimos de temperatura foram registadas em Junho e Janeiro, respectivamente, com o valor máximo a ultrapassar os 40 °C e com o valor mínimo próximo dos 0 °C. Na Figura 5.22 é apresentado um gráfico referente às temperaturas médias ao longo do ano de acordo com a normal climatológica de 1971-2000, onde TA diz respeito à média das temperaturas máximas, TI é a média das temperaturas mínimas, TMA é a temperatura máxima absoluta e TMI é a temperatura mínima absoluta [44].

¹ Designam-se por normais climatológicas os apuramentos estatísticos em períodos de 30 anos que começam no primeiro ano de cada década (1901-30, 1931-1960, ..., 1961-1990...). Estas são as normais de referência, embora se possam calcular e utilizar normais climatológicas nos períodos intercalares, por exemplo, 1951-80, 1971-2000.

No que diz respeito à precipitação e de acordo com a mesma normal climatológica, obtém-se um valor médio anual total de 725,8 mm. Julho é considerado o mês que regista o menor valor de precipitação, com 6,1 mm, enquanto Dezembro aparece como o mês mais chuvoso, com um valor médio total de 121,8 mm. Na Figura 5.23 está presente o registo da precipitação média mensal ao longo do ano de acordo com a normal climatológica de 1971-2000, onde P é a média da precipitação total mensal e PM o valor máximo da precipitação diária.

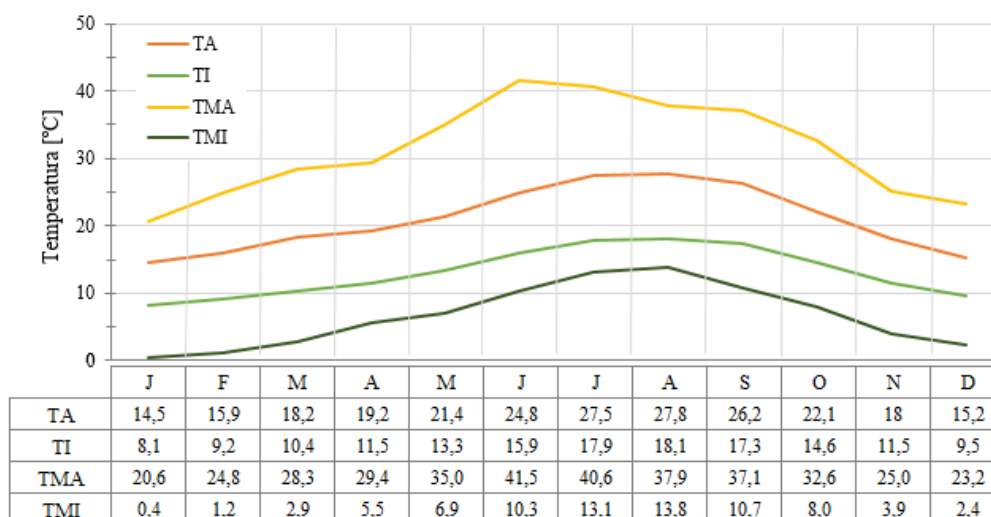


Figura 5.22: Valores de temperaturas registados na cidade de Lisboa segundo a normal climatológica de 1971-2000 (adaptado de [44]).

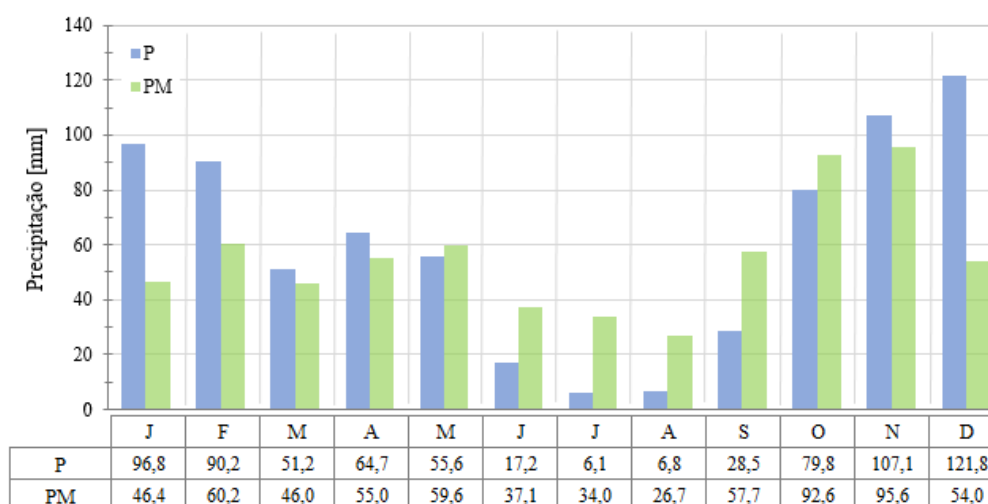


Figura 5.23: Valores da precipitação mensal registados na cidade de Lisboa segundo a normal climatológica de 1971-2000 (adaptado de [44]).

Através da análise das Figuras 5.22 e 5.23 é possível verificar que os meses mais quentes são Julho e Agosto. Nestes dois meses de Verão a temperatura aumenta e os valores médios máximos rondam os 28 °C. As temperaturas altas fazem-se acompanhar de valores de precipitação muito baixos, 6,1 e 6,8 mm. Nos meses de Primavera são atingidas temperatura médias máximas de 22 °C e mínimas de 10 °C. Nesta estação do ano os valores de precipitação mais elevados verificam-se no mês de Abril. Considerando os meses de Inverno e Outono, as temperaturas mais baixas são alcançadas no mês de Janeiro, com um valor médio mínimo de 8 °C. No que diz respeito à precipitação, é no mês de Dezembro

que se registam os valores mais elevados. Entre os meses de Outubro e Fevereiro verificou-se uma precipitação conjunta de 495,7 mm. Em termos de temperatura, os valores médios mínimos variam de 8 °C e 15 °C.

Relativamente ao vento, as frequências de ocorrência predominantes pertencem ao quadrante norte. No entanto, os ventos de noroeste e nordeste também podem ser considerados representativos [4].

Uma vez que a análise microclimática presente neste trabalho incide sobre o ano de 2014, torna-se interessante relacioná-lo com os padrões do passado.

Ao longo de 2014, em Portugal Continental, foram registados valores de temperatura média do ar e de precipitação superiores ao valor médio (período 1971-2000) (Figura 5.24). O valor médio anual da temperatura média do ar, 15,80 °C, foi superior ao valor médio em +0,54°C, sendo o décimo segundo valor mais alto desde 1931. Os valores médios anuais da temperatura máxima e mínima do ar foram superiores aos respectivos valores normais em +0,51 °C e +0,56 °C.

O valor médio de precipitação total anual, 1098,2 mm, corresponde a uma anomalia de +216,1 mm (em relação ao valor médio 1971-2000) o que permite classificar 2014 como um ano muito chuvoso. Valores superiores aos registados este ano ocorreram apenas em cerca de 20 % dos anos (desde 1931), sendo o valor da quantidade de precipitação em 2014 o mais alto dos últimos 25 anos [45].

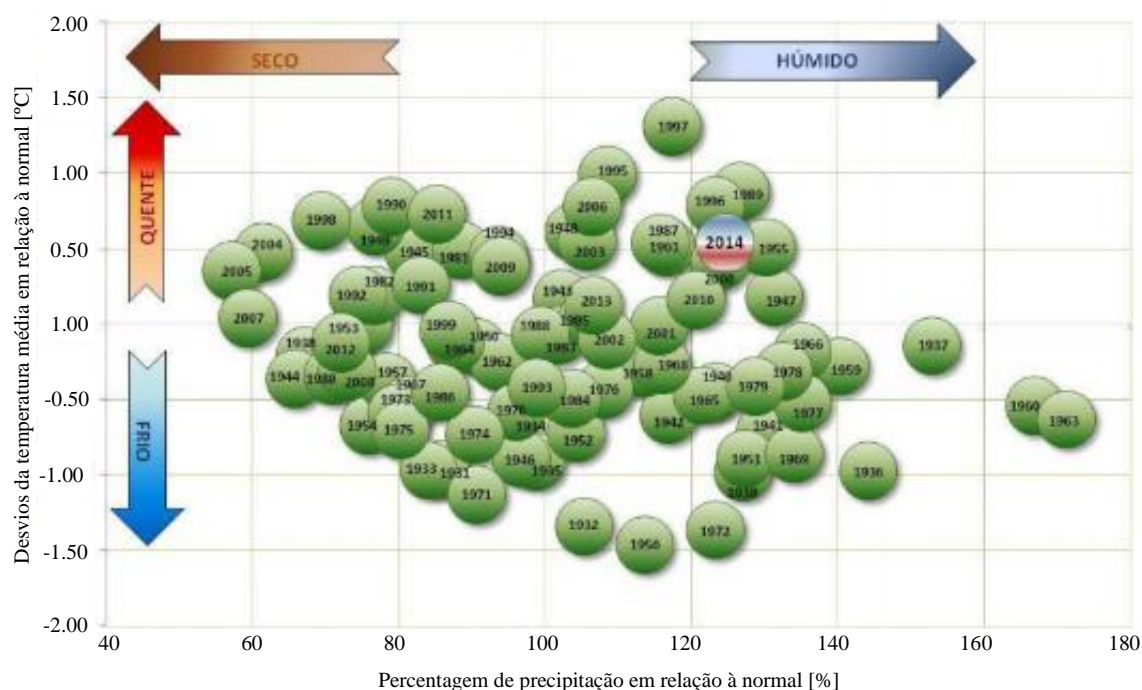


Figura 5.24: Temperatura e precipitação anual (período 1931 – 2014) (adaptado de [45]).

5.4. Registos climáticos

5.4.1. Controlo microclimático e aparelhos utilizados

Todas as salas do Museu, com excepção da Capela das Albertas, estão equipadas com sistema de AVAC (aquecimento, ventilação e ar condicionado) e são impostos limites inferiores e superiores tanto para a temperatura (20-22 °C) como para a humidade relativa (50-60 %).

A responsabilidade na recolha dos registos climáticos coube ao MNAA, que utilizou vários aparelhos que possibilitaram registar os valores horários de temperatura e humidade relativa do ar ao longo do ano de 2014.

Utilizaram-se aparelhos ML400 da Hanwell (Figura 5.25) com uma incerteza de $\pm 0,2$ °C para a temperatura (abaixo do valor recomendado pela norma EN 15758 [46]) e ± 2 % para a humidade relativa (abaixo do valor recomendado pela norma EN 16242 [47]).

Os dados referentes ao ambiente exterior foram recolhidos através da estação meteorológica localizada no Cais do Sodré (Lisboa) e disponibilizados pelo servidor meteorológico *Wunderground* (<http://www.wunderground.com/>).



Figura 5.25: Um dos sensores utilizados para medir a temperatura e humidade relativa no MNAA.

5.4.2. Salas em estudo

Apesar de várias salas do Museu terem aparelhos de monitorização climática instalados, o critério de escolha deveu-se ao período temporal em que os dados foram recolhidos, tendo-se definido a necessidade de analisar registos referentes a um ano completo de modo a garantir uma análise sólida e global.

Assim, foi possível analisar um total de onze salas, sete das quais são de exposição, duas de reserva, uma sala de conservação de pintura e a Capela das Albertas.

As salas de exposição são acessíveis ao público e equipadas com sistemas de climatização. À semelhança das anteriores, também as salas de reserva, localizadas no piso -1, têm sistema de climatização instalado, no entanto não são acessíveis ao público e na maior parte do tempo permanecem fechadas. A sala de conservação de pintura, apesar de ter um controlo ambiental reduzido, tem uma janela que permanece aberta durante grande parte do dia, o que contribui para o aumento da ventilação. Assim, considerou-se a sala como não controlada. A Capela das Albertas não

esteve acessível ao público durante o ano de 2014 e não é dotada de sistema de climatização. Na Tabela 5.2 é possível observar com maior detalhe as características das salas em análise e a Figura 5.26 mostra a sua localização em planta.

Tabela 5.2: Características das salas em análise.

Sala	13	12	11	16	25	41	61	Reserva Casa Forte	Reserva de pintura	Conservação de pintura	Capela das Albertas
Piso/Orientação	3/int	3/E	3/SE	2/N	2/S	1/S	1/SE	-1	-1	-1	1/N
Visitável	s	s	s	s	s	s	s	n	n	n	n
AVAC	s	s	s	s	s	s	s	s	s	n	n

S – Sul; N – Norte; E – Este; SE – Sudeste; int. – interior; s – sim; n – não



Figura 5.26: Plantas do Museu.

As Figuras 5.27 a 5.36 mostram o interior das salas em análise.



Figura 5.27: Sala 13, piso 3 (vista E-W).



Figura 5.28: Sala 12, piso 3 (vista NW-SE).



Figura 5.29: Sala 11, piso 3 (vista SW-NE).



Figura 5.30: Sala 16, piso 2 (vista N-S).



Figura 5.31: Sala 25, piso 2 (vista N-S).



Figura 5.32: Sala 41, piso 1 (vista N-S).



Figura 5.33: Sala 61, piso 1 (vista NW-SE).



Figura 5.34: Sala de reserva de pintura, piso -1 (vista W-E).



Figura 5.35: Sala de conservação de pintura, piso -1 (vista NW-SE).



Figura 5.36: Capela das Albertas (sala 31/32), piso 0 (vista E-S).

5.5. Tratamento de dados

5.5.1. Geral

De forma a compreender o microclima do museu e a sua relação com as condições externas efectuou-se uma análise global de temperatura, humidade relativa e concentração de vapor de água para o interior e exterior. Assim, através da representação gráfica destes parâmetros é possível avaliar os padrões climáticos.

Os valores interiores de temperatura e humidade relativa foram registados pelos sensores instalados, enquanto os dados referentes ao ambiente exterior foram obtidos através da estação meteorológica do Cais do Sodré. No que diz respeito à concentração de vapor de água, os valores foram calculados através da equação 2.10.

De modo a complementar a análise e a perceber as variações sazonais recorreu-se a uma técnica descrita na norma europeia EN 15757 [32] e que consiste no cálculo de uma média móvel a 30 dias centrada sobre o valor desejado, considerando os registos dos 15 dias anteriores e posteriores ao valor em análise. Esta pode ser calculada através da equação 5.1:

$$X_i = \frac{1}{n + 1} \cdot \sum_{i-0,5 \cdot n}^{i+0,5 \cdot n} X \quad (5.1)$$

onde, X_i é a média móvel a 30 dias centrada no ponto i , x é a t ($^{\circ}\text{C}$), Hr (%) ou v (g/m^3), n é o número de registos durante 30 dias e i é o ponto central.

Apesar de em alguns estudos ser comum a utilização de uma média móvel a 90 dias, optou-se pela utilização de uma média móvel a 30 dias, de acordo com a metodologia presente na EN 15757 e na metodologia FCT-UNL.

5.5.2. Índice de desempenho

É comum que os museus apresentem sistemas de climatização de modo a controlar a temperatura e humidade relativa e assim limitar o risco de perda das colecções. Muitas vezes são definidos intervalos muito exigentes que levam a um grande consumo energético, apesar de em determinados casos esses valores não serem cumpridos, quer por algum defeito do sistema ou pelas limitações do edifício.

Para avaliar o cumprimento dos intervalos definidos foi utilizado um método definido por Gorgnati *et al.* [48], denominado como “*Performance Index*” e que permite avaliar a qualidade microclimática em museus. Este “*Performance Index*”, aqui designado como Índice de Desempenho, exprime a percentagem de tempo em que os parâmetros medidos se situam dentro do intervalo de referência. Esta abordagem pode ser facilmente utilizada para avaliar o desempenho de ambientes controlados mecanicamente, ou seja, permite verificar a capacidade dos sistemas de controlo de microclima para manter os parâmetros higrotérmicos nos valores impostos.

De forma a melhor compreender se o clima interior se está a comportar de acordo com os limites (inferiores e superiores) de temperatura e humidade relativa impostos recorre-se a um gráfico que combina temperatura no eixo das ordenadas e humidade relativa no eixo das abcissas [49].

Consoante a combinação temperatura-humidade relativa, o clima interior situar-se-á num dos cenários definidos na matriz presente na Figura 5.37, que facilita a análise. [28].

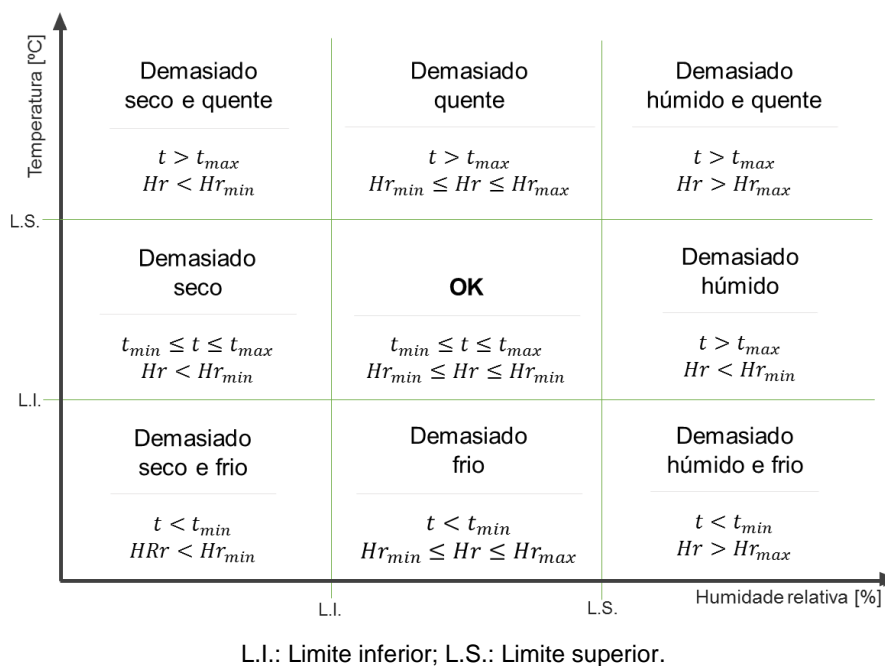


Figura 5.37: Índice de desempenho (adaptado de [28]).

O clima é considerado quente se o valor de temperatura medido for maior do que o limite superior. Se pelo contrário este valor for menor do que o limite inferior, o clima diz-se frio. Em termos de humidade relativa, o clima é considerado húmido quando o valor medido é mais elevado do que o limite superior e seco caso o valor medido seja inferior ao limite inferior.

São cumpridos os requisitos caso a temperatura e humidade relativa estejam entre os valores mínimos e máximos exigidos (intervalo definido como “OK”). Por exemplo, se tanto os valores de temperatura como de humidade relativa superarem os limites superiores, então o clima é considerado “Demasiado húmido e quente”.

Na Figura 5.38 apresenta-se um exemplo de aplicação desta metodologia. Os limites inferior e superior impostos para a temperatura foram, respectivamente, 20 e 22 °C. Por sua vez, a humidade relativa foi limitada para valores entre 50 e 60 %. Observa-se que o índice de desempenho está dentro dos limites impostos em 26,3 % do tempo.

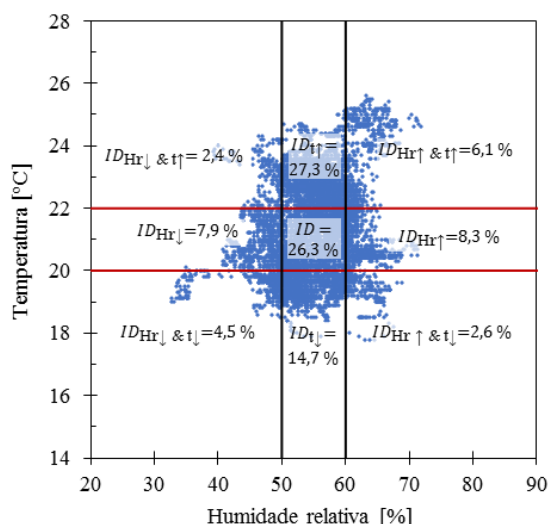


Figura 5.38: Exemplo de aplicação da metodologia – Índice de desempenho.

5.5.3. Especificação ASHRAE

Para avaliar o risco de degradação das colecções para cada sala optou-se por utilizar uma especificação presente no capítulo 21 do manual da *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, inc (ASHRAE) - Museums, Galleries, Archives, and Libraries* - e a partir daqui denominada como especificação ASHRAE [29].

A especificação ASHRAE define classes de risco de degradação em função de pequenas flutuações e ajustes sazonais, mais ou menos exigentes, em torno dos valores de referência (Tabela 4.5). A classe mais exigente é a AA, pois limita de forma relevante as variações de temperatura e humidade relativa. Por sua vez, a classe menos exigente é a D, limitando apenas o intervalo superior de humidade relativa.

A ASHRAE especifica que o valor da média anual deve estar entre 15 e 25 °C para o caso da temperatura e 50 % para a humidade relativa ou o valor correspondente à média anual para as colecções permanentes.

A especificação foi formulada com o intuito de auxiliar o projecto, contudo tem sido amplamente utilizada como método de classificação para edifícios já existentes. Para aplicá-la como método de classificação é necessário que cada classe climática seja avaliada individualmente e para que se possa definir essa tal classe é necessário que se cumpram, em simultâneo, os intervalos para as flutuações sazonais e de curta duração [7] [18] [28].

De forma a possibilitar uma fácil compreensão do método apresenta-se na Tabela 5.3 a descrição e representação gráfica de um exemplo de aplicação da especificação para a classe climática As. O processo tem início com o conjunto dos registos horários de temperatura e humidade relativa ao longo de um ano (a). Calculam-se os valores da média anual para a temperatura e humidade relativa e definem-se os ciclos sazonais com base numa média móvel a 30 dias (b). Numa terceira fase são tidas em conta as imposições para cada classe. Neste caso em concreto a classe As estabelece que os ajustes sazonais em relação à média anual não devem ultrapassar +5 °C nem -10 °C para a temperatura e não devem ser superiores a ± 10 % para a humidade relativa face à média anual. Desta forma, ajusta-se a curva do ciclo sazonal: os valores abaixo e acima dos valores mínimos e máximos permitidos pelos ajustes sazonais da classe são substituídos por esses valores. Resumidamente, verifica-se o intervalo admissível para as variações sazonais relativamente à média anual e adapta-se a média móvel,

obtendo-se o ciclo sazonal ajustado (c). De seguida são tidas em conta as flutuações de curta duração permitidas pela classe. No caso da classe As é permitida uma flutuação de ± 2 °C para a temperatura e ± 5 % para a humidade relativa. Somam-se as flutuações de curta duração permitidas à curva do ciclo sazonal ajustado e delimita-se a banda microclimática adequada à classe (d). Por fim, calcula-se a percentagem de tempo em que a temperatura e humidade relativa se encontram dentro dos limites impostos pela respectiva classe.

Apesar de a especificação assumir que um clima apenas pertence a uma classe quando 100 % dos seus valores pertencem ao respectivo intervalo, em muitos estudos não se optou pela definição da classe exacta. Tem sido comum a realização de uma análise completa, através da verificação da percentagem de valores que cumprem cada classe, o que permite ter uma base para possíveis alterações [7].

Tabela 5.3: Descrição e representação da especificação ASHRAE, para a classe As: a) Representação dos dados climáticos de temperatura e humidade relativa; b) Representação da média anual e do ciclo sazonal; c) Ciclo sazonal ajustado; d) Banda que limita a classe. A coluna da esquerda refere-se à temperatura e a da direita à humidade relativa.

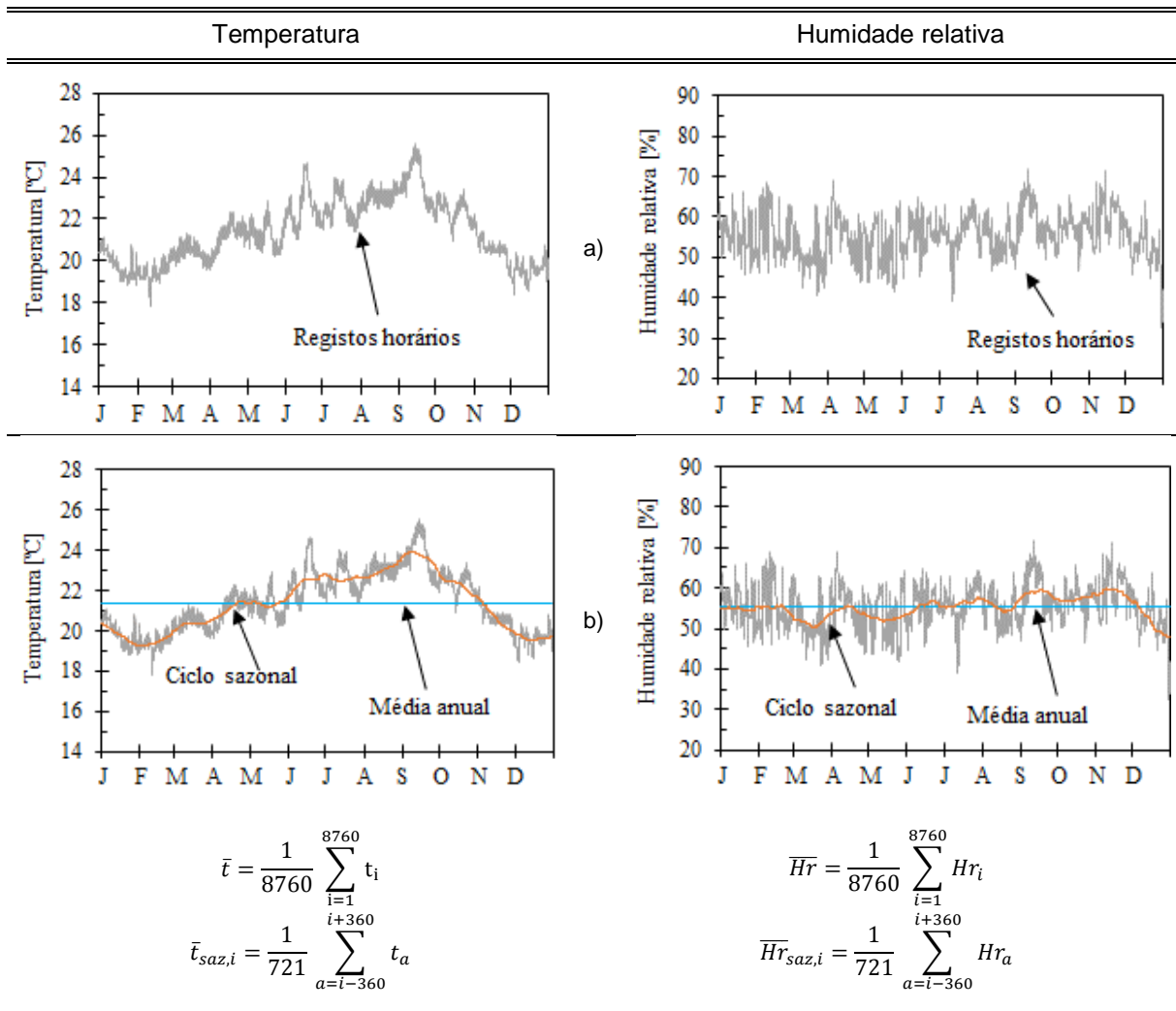
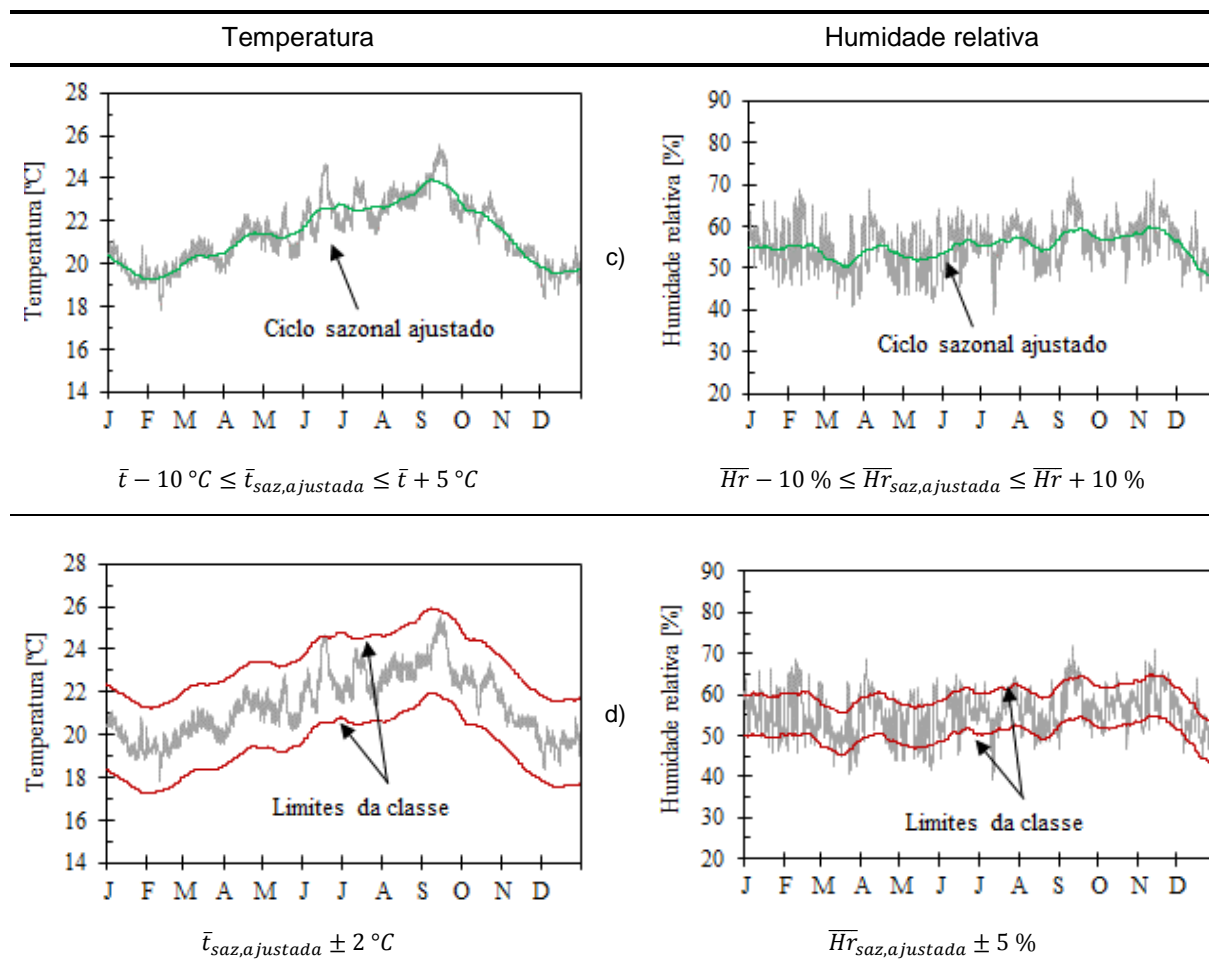


Tabela 5.3: Descrição e representação da especificação ASHRAE, para a classe As: a) Representação dos dados climáticos de temperatura e humidade relativa; b) Representação da média anual e do ciclo sazonal; c) Ciclo sazonal ajustado; d) Banda que limita a classe. A coluna da esquerda refere-se à temperatura e a da direita à humidade relativa (continuação).



5.5.4. Metodologia FCT-UNL

Para além da análise e avaliação do microclima interior do museu decidiu-se definir faixas sustentáveis de temperatura e humidade relativa com base numa metodologia recente – metodologia FCT-UNL – com o intuito de reduzir a exigência dos limites sem comprometer o nível de exigência para a conservação. A metodologia FCT-UNL propõe uma análise aos dados de temperatura e humidade relativa de edifícios históricos em climas temperados com o objectivo de definir uma faixa sustentável destes parâmetros, exigindo a recolha de dados de pelo menos um ano. Esta metodologia foi definida em 2014 e entretanto foi testada e validada para o tipo de clima de Lisboa [33] [35], o que contribuiu de forma preponderante para a sua utilização na presente dissertação.

A sua génese assenta em dois conceitos fundamentais: aclimatização e *proofed fluctuations*. O primeiro defende que quando um material é exposto durante um período suficientemente longo a determinado ambiente, caso este não esteja de acordo com as suas necessidades originais ou com o clima ao qual ele tem sobrevivido, sofrerá um processo de readaptação às novas condições de temperatura e humidade relativa até atingir um novo equilíbrio. Tal processo de readaptação gera tensões que podem levar à abertura de fendas e a deformações irreversíveis. O material acaba por perder a sua elasticidade inicial e por essa razão não deve sofrer uma nova alteração sob pena de perda total [2] [32]. O conceito

de “*proofed fluctuations*”, definido por Michalski, permite complementar o conceito de aclimatização e defende que se no futuro as maiores flutuações do passado não forem ultrapassadas, o risco de novos danos mecânicos é reduzido [35].

Esta metodologia procura limitar as variações sazonais e as flutuações de curta duração, considerando as médias anuais históricas de temperatura e humidade relativa como valores de referência. Para além dos ciclos de curta duração, também limitados na norma europeia EN 15757, a metodologia FCT-UNL limita também os ciclos sazonais em torno da média anual. Assim, procura-se atingir um equilíbrio entre as limitações sazonais e de curta duração e com o clima exterior de modo a atingir limites razoavelmente sustentáveis.

De forma a possibilitar uma melhor compreensão da metodologia, apresenta-se a sua descrição e representação gráfica na Tabela 5.4. O processo tem início com o conjunto dos registos horários de temperatura e humidade relativa ao longo de um ano (a). Através destes registos são calculadas as médias anuais (\bar{t} ; \overline{Hr}) e o ciclo sazonal (média móvel a 30 dias) ($\bar{t}_{i,saz}$; $\overline{Hr}_{i,saz}$) para a temperatura e humidade relativa (b). De seguida pretende-se calcular os limites mínimo e máximo do ciclo sazonal. Para tal subtrai-se a média anual ao ciclo sazonal em cada instante, ordena-se o resultado desta subtração por ordem crescente e determinam-se o 10º e 90º percentis dessa diferença. O ciclo sazonal sustentável encontra-se assim limitado em relação à média anual por estes dois valores (c). Desta forma, ajusta-se a curva do ciclo sazonal: os valores abaixo e acima dos valores mínimos e máximos permitidos são substituídos por esses valores, obtendo-se a curva do ciclo sazonal sustentável ($\bar{t}_{i,saz\ sust}$; $\overline{Hr}_{i,saz\ sust}$) (d). As flutuações de curta duração ($\Delta t_{i,FCD}$; $\Delta Hr_{i,FCD}$) são calculadas com base nas diferenças entre os valores horários e os respectivos valores do ciclo sazonal sustentável. De seguida ordenam-se por ordem crescente os valores das flutuações de curta duração e determinam-se os 5º e 95º percentis dessas flutuações (e). A banda que limita a classe para cada parâmetro é definida pela subtração e adição do 5º e do 95º percentis aos valores do ciclo sazonal sustentável, obtendo-se os limites sustentáveis (f). Como referido anteriormente, a Classe 1 apresenta mais limitações comparativamente com a Classe 2. Posto isto, os limites sustentáveis sofrem alteração face à classe 2. A temperatura não se deve afastar da média anual em mais de 10 °C e não deve apresentar valores superiores a 30 °C. A humidade relativa não se deve afastar em mais de 15 % da média anual e o seu valor máximo é de 75 % (g).

Tabela 5.4: Descrição da metodologia FCT-UNL: a) Representação dos dados climáticos de temperatura e humidade relativa; b) Representação da média anual e do ciclo sazonal; c) Limites do ciclo sazonal; d) Ciclo sazonal sustentável; e) Flutuações de curta duração; f) Limites sustentáveis; g) Limitações extra para a classe 1. A coluna da esquerda refere-se à temperatura e a da direita à humidade relativa.

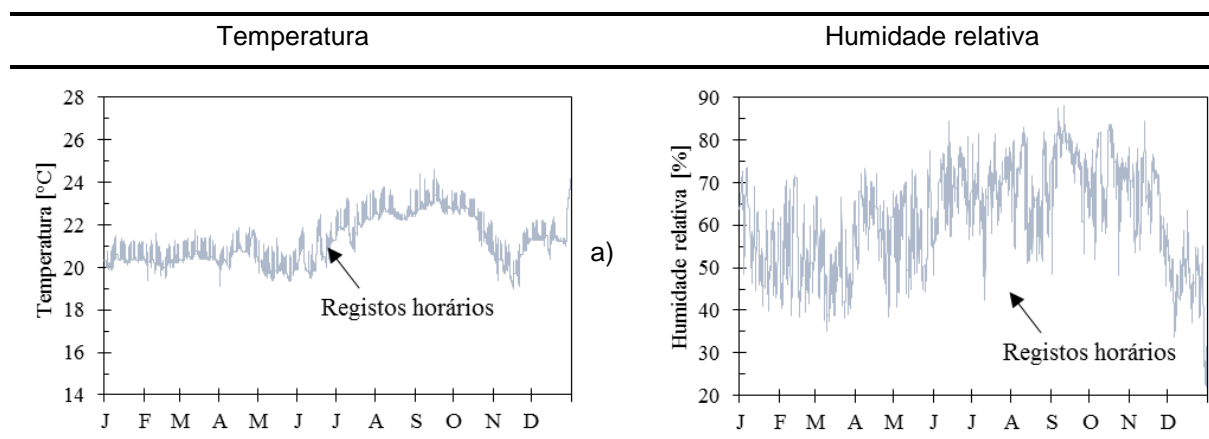


Tabela 5.4: Descrição da metodologia FCT-UNL: a) Representação dos dados climáticos de temperatura e humidade relativa; b) Representação da média anual e do ciclo sazonal; c) Limites do ciclo sazonal; d) Ciclo sazonal sustentável; e) Flutuações de curta duração; f) Limites sustentáveis; g) Limitações extra para a classe 1. A coluna da esquerda refere-se à temperatura e a da direita à humidade relativa (continuação).

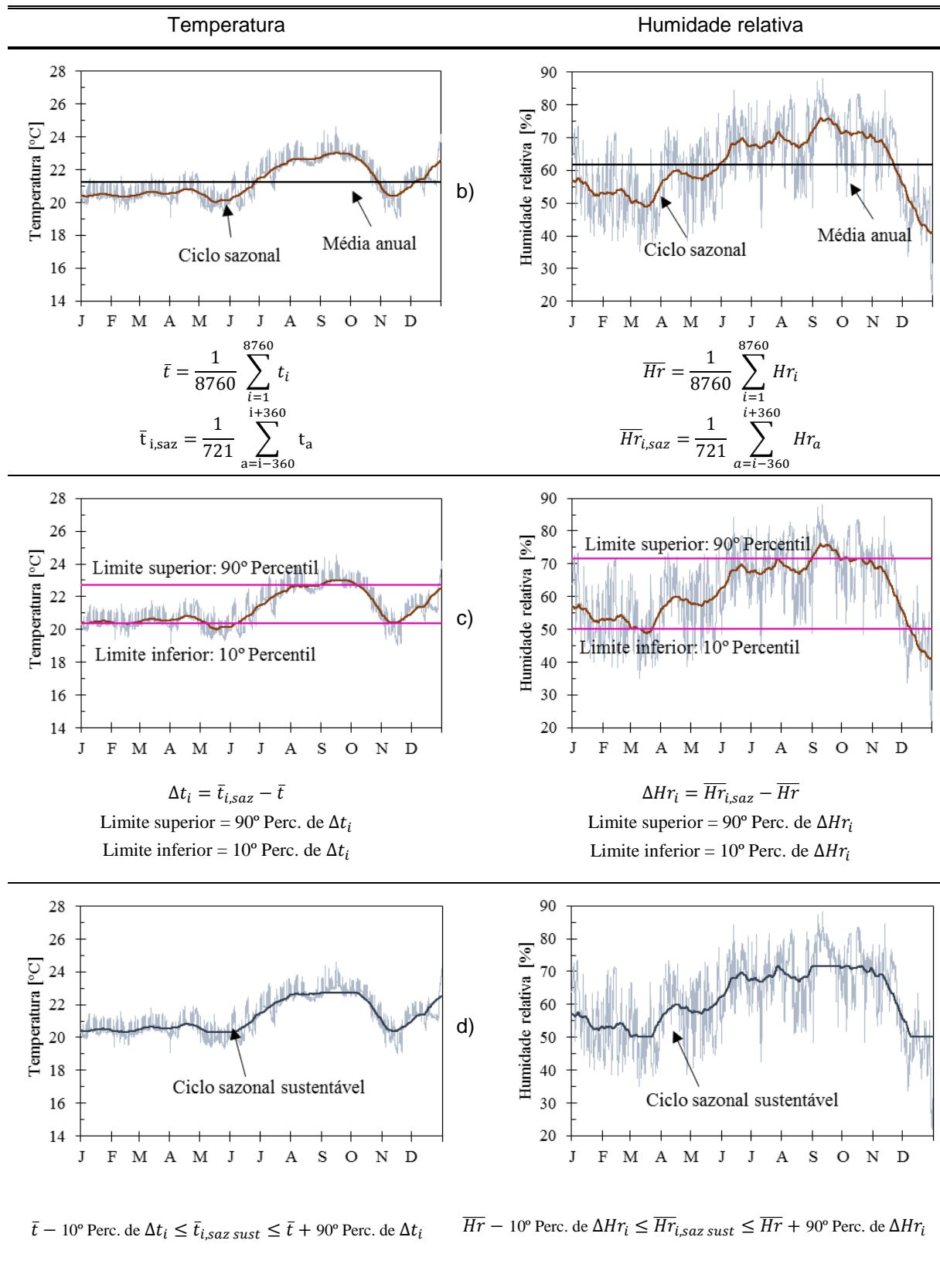
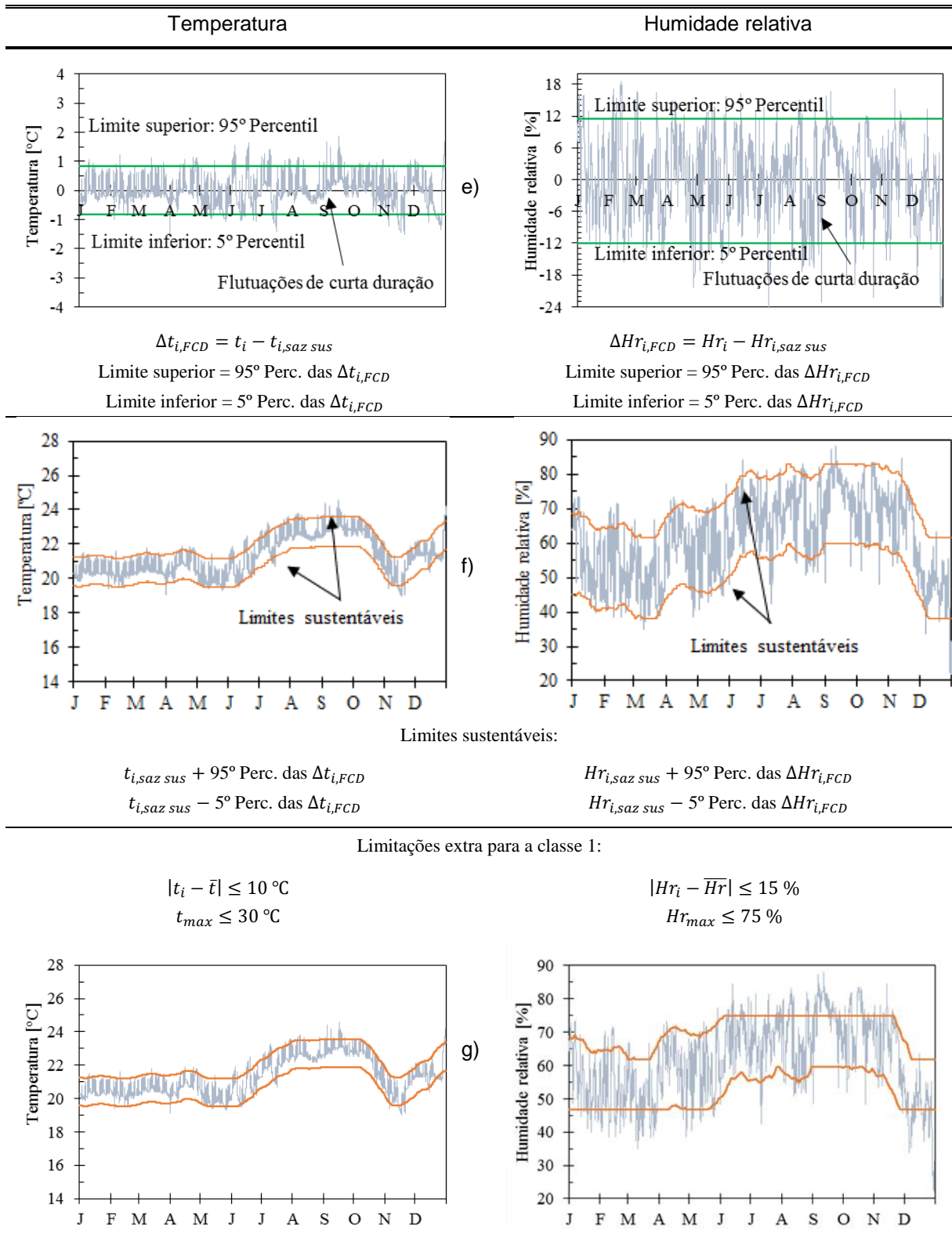


Tabela 5.4: Descrição da metodologia FCT-UNL: a) Representação dos dados climáticos de temperatura e humidade relativa; b) Representação da média anual e do ciclo sazonal; c) Limites do ciclo sazonal; d) Ciclo sazonal sustentável; e) Flutuações de curta duração; f) Limites sustentáveis; g) Limitações extra para a classe 1. A coluna da esquerda refere-se à temperatura e a da direita à humidade relativa (continuação).



6. Análise e discussão de resultados

6.1. Considerações prévias

A caracterização microclimática de edifícios históricos assume um papel fundamental para a sua conservação e definição de intervenções a efectuar. Neste sentido o presente estudo permitiu caracterizar o microclima interno de algumas salas do Museu Nacional de Arte Antiga.

De forma a caracterizar o clima do MNAA, optou-se por apresentar primeiramente os valores globais de temperatura e humidade relativa e posteriormente uma análise da influência da orientação e exposição, onde foram comparados os comportamentos de determinadas salas. Assim, foi possível ter uma percepção geral da evolução da temperatura, humidade relativa e concentração de vapor de água ao longo do período em estudo. De seguida efectuou-se uma análise mais refinada, para melhor compreender a amplitude dos ciclos diários. São apresentados os índices de desempenho para cada sala em estudo, de modo a compreender se os limites de temperatura e humidade relativa são devidamente cumpridos.

Numa segunda fase efectuou-se a avaliação do clima interior do ponto de vista da conservação com o auxílio da especificação ASHRAE e posteriormente definiram-se intervalos sustentáveis através da metodologia FCT-UNL.

6.2. Análise geral do microclima interior

A análise geral do microclima interior, onde se pretendeu averiguar a influência que o clima exterior exerce sob o interior, encontra-se organizada segundo a função de cada sala. Começou-se por apresentar o comportamento geral das salas de exposição (salas 13, 12, 11, 16, 25, 41 e 61), de seguida são analisados e discutidos os resultados obtidos para as salas de reserva (reserva Casa Forte e reserva de pintura) e por fim a sala de conservação de pintura e a Capela das Albertas.

De forma geral, foi possível verificar que tanto para a temperatura como para a humidade relativa, as variações horárias com maior amplitude foram verificadas, como seria de esperar, para o exterior, comprovando-se uma maior estabilidade do clima interior.

Considerando os dados de temperatura exterior, verificou-se uma tendência crescente de Março a Setembro, invertendo-se essa tendência no restante período do ano. O menor valor de temperatura registado foi de 4 °C a 20 de Dezembro e o maior foi de 36,6 °C a 14 de Junho. Relativamente à humidade relativa, os valores do exterior apresentam grandes variações, obtendo-se o valor mais elevado a 12 de Fevereiro – 98 %, enquanto o valor mais baixo foi registado em Maio e Junho – 23 %.

6.2.1. Salas de exposição

Através da análise das Figuras 6.1 a 6.3 é possível comparar a evolução da temperatura (*a*), concentração de vapor de água (*b*) e humidade relativa (*c*) em termos de registos horários e ciclos sazonais (média móvel a 30 dias) para o exterior e interior das salas do piso 3 - salas 13, 12 e 11, respectivamente, e a sua localização (*d*).

Na sala 13 obteve-se uma temperatura média anual de 21,3 °C, com um valor máximo absoluto de 25,1 °C e um valor mínimo igual a 18,7 °C. Na sala 12 registou-se uma temperatura média anual de

21,4 °C, com um valor máximo de 25,6 °C e um valor mínimo igual a 17,8 °C. Na sala 11 registou-se uma temperatura média anual de 21,1 °C, com um valor máximo de 25,6 °C e um valor mínimo igual a 18,4 °C.

No que diz respeito à humidade relativa, registou-se um valor médio anual de 56,1 % para a sala 13, 55,2 % para a sala 12 e 56,5 % para a sala 11. Relativamente aos valores máximos e mínimos absolutos, registaram-se os pares 75,4/31,4 % para a sala 13, 71,8/32,7 % para a sala 12 e 75,2/32,7 % para a sala 11.

Relativamente à concentração de vapor de água, registou-se um valor médio anual de 10,5 g/m³ para as salas 13 e 11 e 10,4 g/m³ para a sala 12. Em relação aos valores máximos e mínimos absolutos, registaram-se os pares 16,7/5,5 g/m³ para a sala 13 e 16,3/5,3 g/m³ para as salas 12 e 11.

Através da análise dos valores horários de humidade relativa é ainda possível concluir que não existem valores que possam constituir risco de condensações superficiais. Nas Figuras 6.4, 6.5 e 6.6 é possível visualizar a representação dos valores de temperatura/humidade relativa/concentração de vapor de água das salas 13, 12 e 11 no diagrama psicrométrico, de onde é possível concluir que apenas uma diferença de cerca de 5,5 °C da temperatura superficial face à temperatura do ar poderia conduzir a condensações superficiais.

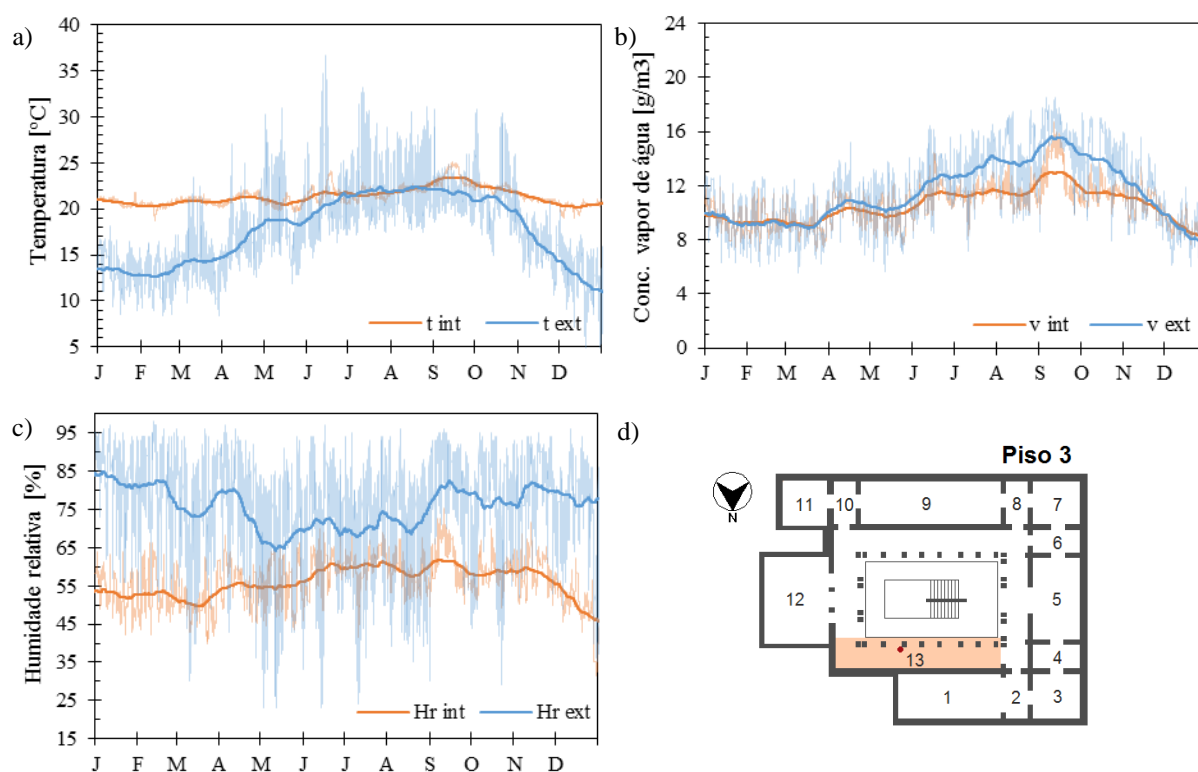


Figura 6.1: Evolução do clima interior da sala 13 no ano de 2014: a) Temperatura; b) Concentração de vapor de água; c) Humidade relativa. Os registos horários encontram-se representados pelas cores com maior transparência e os ciclos sazonais pelas cores mais fortes; d) Localização da sala em análise.

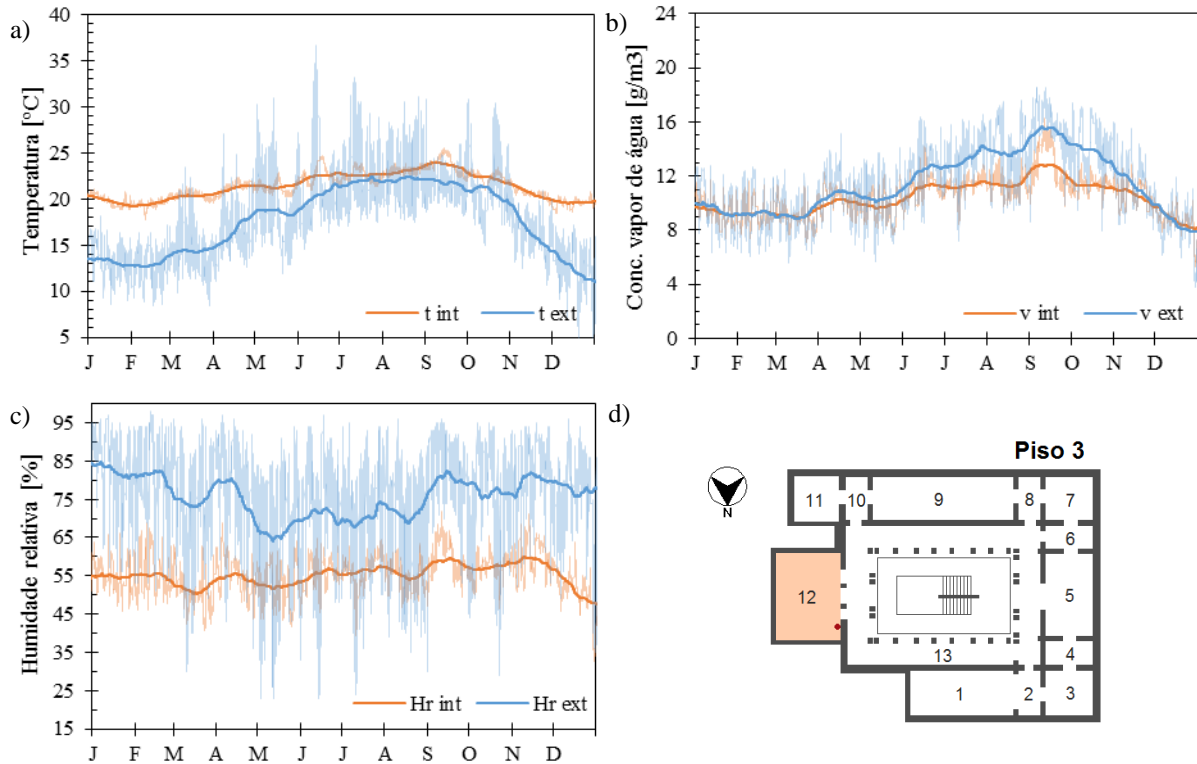


Figura 6.2: Evolução do clima interior da sala 12 no ano de 2014: a) Temperatura; b) Concentração de vapor de água; c) Humidade relativa; Os registos horários encontram-se representados pelas cores com maior transparência e os ciclos sazonais pelas cores mais fortes; d) Localização da sala em análise.

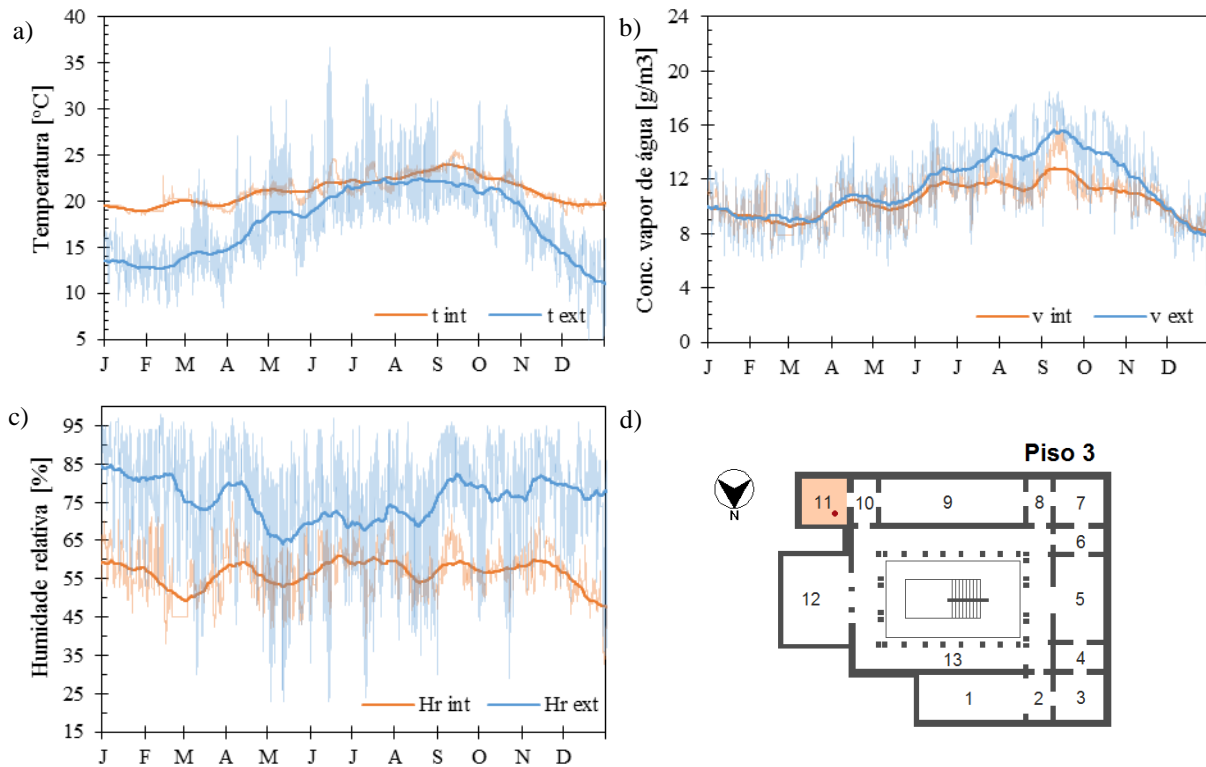


Figura 6.3: Evolução do clima interior da sala 11 no ano de 2014: a) Temperatura; b) Concentração de vapor de água; c) Humidade relativa. Os registos horários encontram-se representados pelas cores com maior transparência e os ciclos sazonais pelas cores mais fortes; d) Localização da sala em análise.

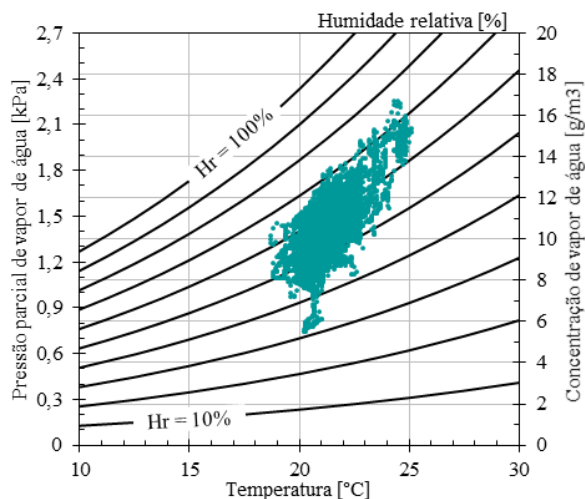


Figura 6.4: Representação, no diagrama psicrométrico, dos valores de temperatura e humidade relativa da sala 13.

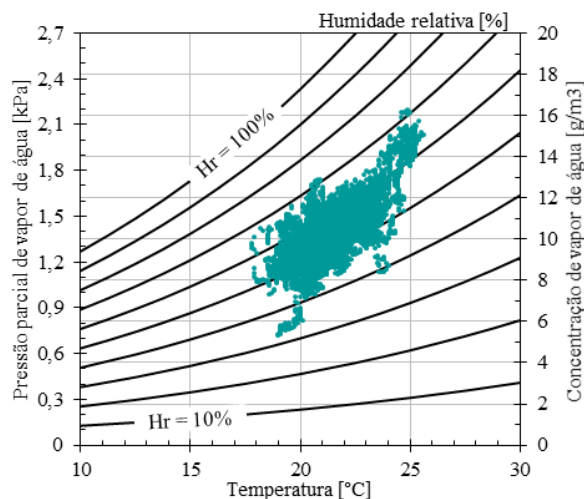


Figura 6.5: Representação, no diagrama psicrométrico, dos valores de temperatura e humidade relativa da sala 12.

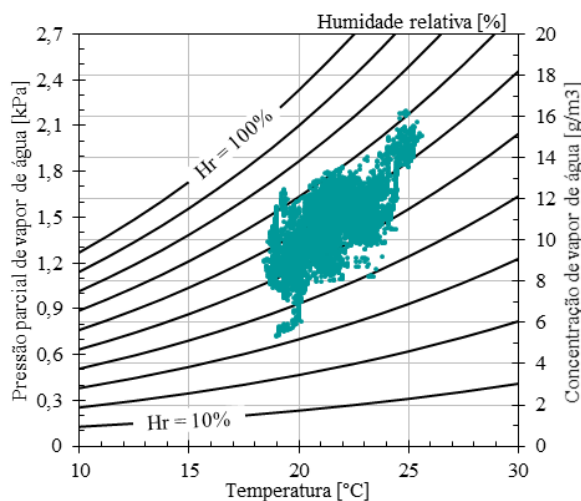


Figura 6.6: Representação, no diagrama psicrométrico, dos valores de temperatura e humidade relativa da sala 11.

Através da análise das Figuras 6.7 e 6.8 é possível comparar a evolução do clima em termos de registos horários e ciclos sazonais (média móvel a 30 dias) para o exterior e interior das salas 16 e 25, respectivamente, localizadas no piso 2.

Na sala 16 obteve-se uma temperatura média anual de 21,6 °C, com um valor máximo absoluto de 25,6 °C e um valor mínimo igual a 19,5 °C. Na sala 25 registou-se uma temperatura média anual de 22,9 °C, com um valor máximo de 27,7 °C e o mínimo igual a 18,8 °C.

No que respeita à humidade relativa, registou-se um valor médio anual de 55,7 % para a sala 16 e de 51,5 % para a sala 25. Relativamente aos valores máximos e mínimos absolutos, registaram-se os pares 78,8/30,7 % para a sala 16 e 68,9/24 % para a sala 25.

Relativamente à concentração de vapor de água, registou-se um valor médio anual de 10,6 g/m³ tanto para a sala 16 como para a sala 25. Em relação aos valores máximos e mínimos absolutos, registaram-se os pares 17,8/5,8 g/m³ para a sala 16 e 17/5,2 g/m³ para a sala 25.

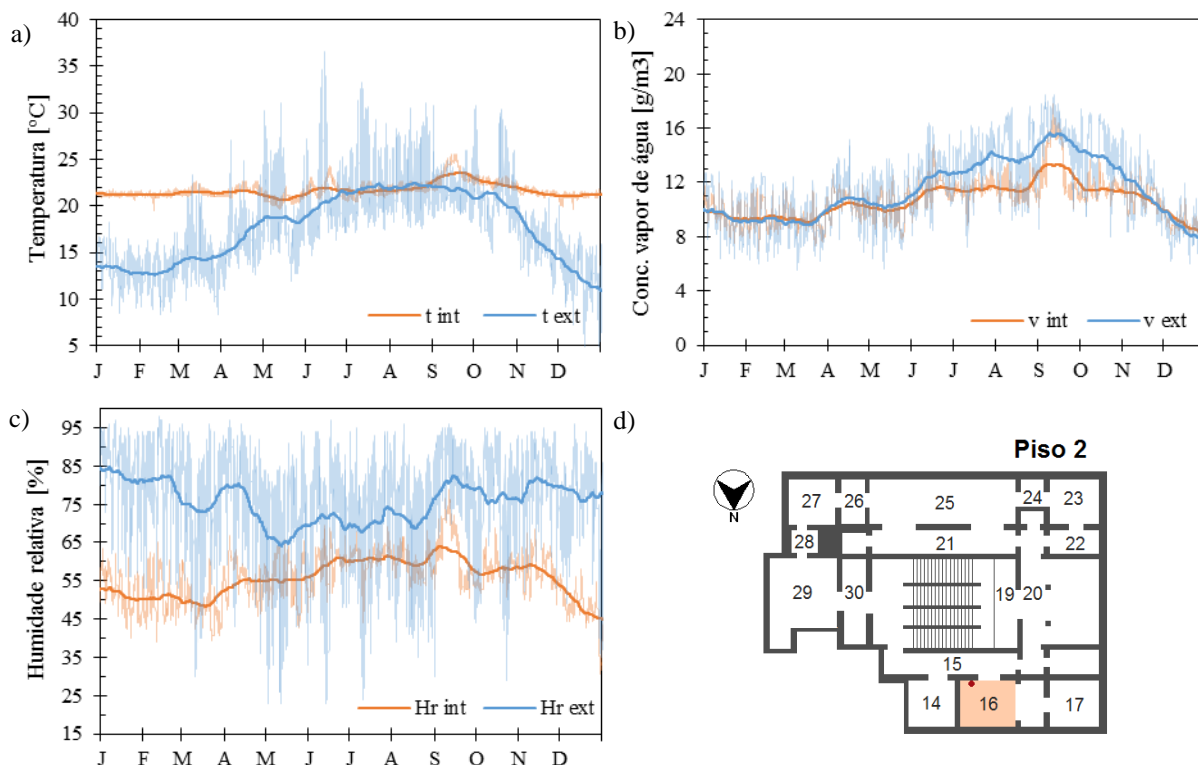


Figura 6.7: Evolução do clima interior da sala 16 no ano de 2014: a) Temperatura; b) Concentração de vapor de água; c) Humidade relativa. Os registos horários encontram-se representados pelas cores com maior transparência e os ciclos sazonais pelas cores mais fortes; d) Localização da sala em análise.

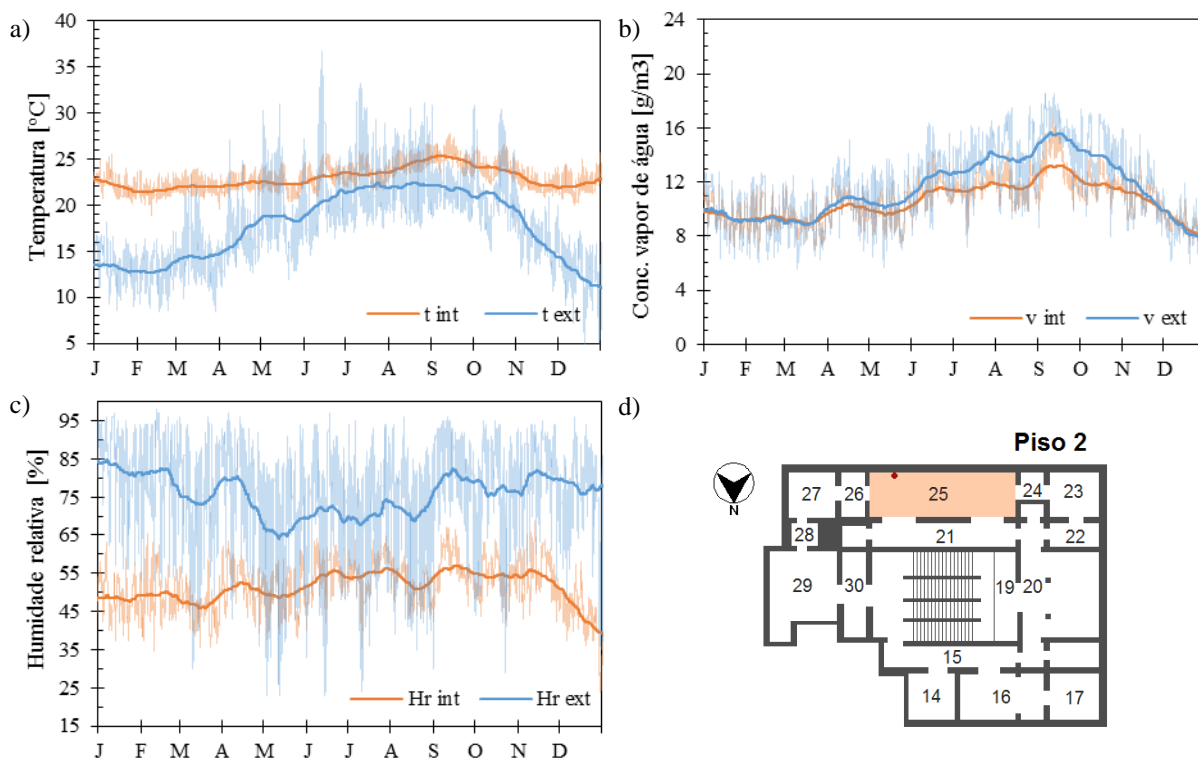


Figura 6.8: Evolução do clima interior da sala 25 no ano de 2014: a) Temperatura; b) Concentração de vapor de água; c) Humidade relativa. Os registos horários encontram-se representados pelas cores com maior transparência e os ciclos sazonais pelas cores mais fortes; d) Localização da sala em análise.

Através da análise dos valores horários de humidade relativa é ainda possível concluir que não existem valores que possam constituir risco de condensações superficiais. Nas Figuras 6.9 e 6.10 é possível visualizar a representação dos valores de temperatura/humidade relativa/concentração de vapor de água das salas 16 e 25 no diagrama psicrométrico, de onde é possível concluir que apenas uma diferença de cerca de 4 °C para a sala 16 e 6 °C para a sala 25 da temperatura superficial face à temperatura do ar poderia conduzir a condensações superficiais.

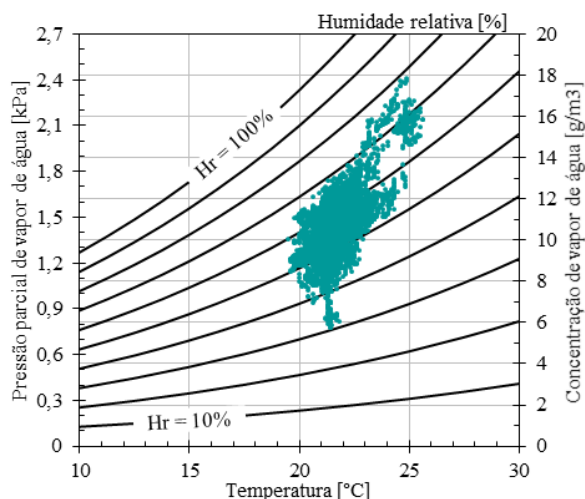


Figura 6.9: Representação, no diagrama psicrométrico, dos valores de temperatura e humidade relativa da sala 16.

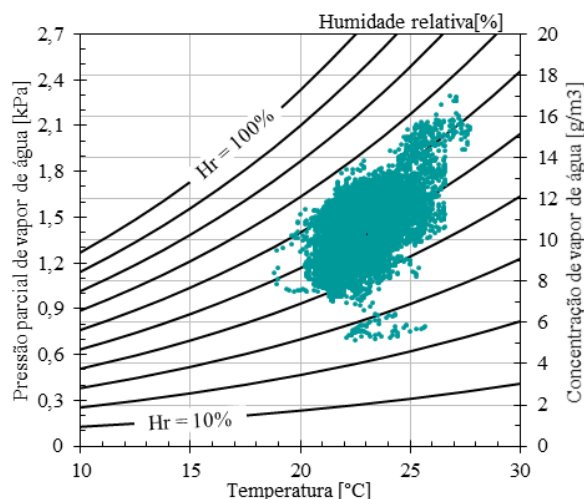


Figura 6.10: Representação, no diagrama psicrométrico, dos valores de temperatura e humidade relativa da sala 25.

Através da análise das Figuras 6.11 e 6.12 é possível comparar a evolução do clima em termos de registos horários e ciclos sazonais (média móvel a 30 dias) para o exterior e interior das salas 41 e 61, respectivamente, localizadas no piso 1.

Na sala 41 obteve-se uma temperatura média anual de 22,5 °C, com um valor máximo absoluto de 26,8 °C e um valor mínimo igual a 20,2 °C. Na sala 61 registou-se uma temperatura média anual de 20,8 °C, com um valor máximo de 26,8 °C e um valor mínimo igual a 16,5 °C.

Relativamente à humidade relativa, registou-se um valor médio anual de 52,5 % para a sala 41 e 56,3 % para a sala 61. Em relação aos valores máximos e mínimos absolutos, registaram-se os pares 69/26 % para a sala 41 e 73,5/40,5 % para a sala 61.

No que respeita à concentração de vapor de água, registou-se um valor médio anual de 10,6 g/m³ para a salas 41 e 10,3 g/m³ para a sala 61. Relativamente aos valores máximos e mínimos absolutos, registaram-se os pares 16,4/5,2 g/m³ para a sala 41 e 16,1/6,5 g/m³ para a sala 61.

Através da análise dos valores horários de humidade relativa é ainda possível concluir que não existem valores que possam constituir risco de condensações superficiais. Nas Figuras 6.13 e 6.14 é possível visualizar a representação dos valores de temperatura/humidade relativa/concentração de vapor de água das salas 41 e 61 no diagrama psicrométrico, de onde é possível concluir que apenas uma diferença de cerca de 6 °C da temperatura superficial face à temperatura do ar poderia conduzir a condensações superficiais.

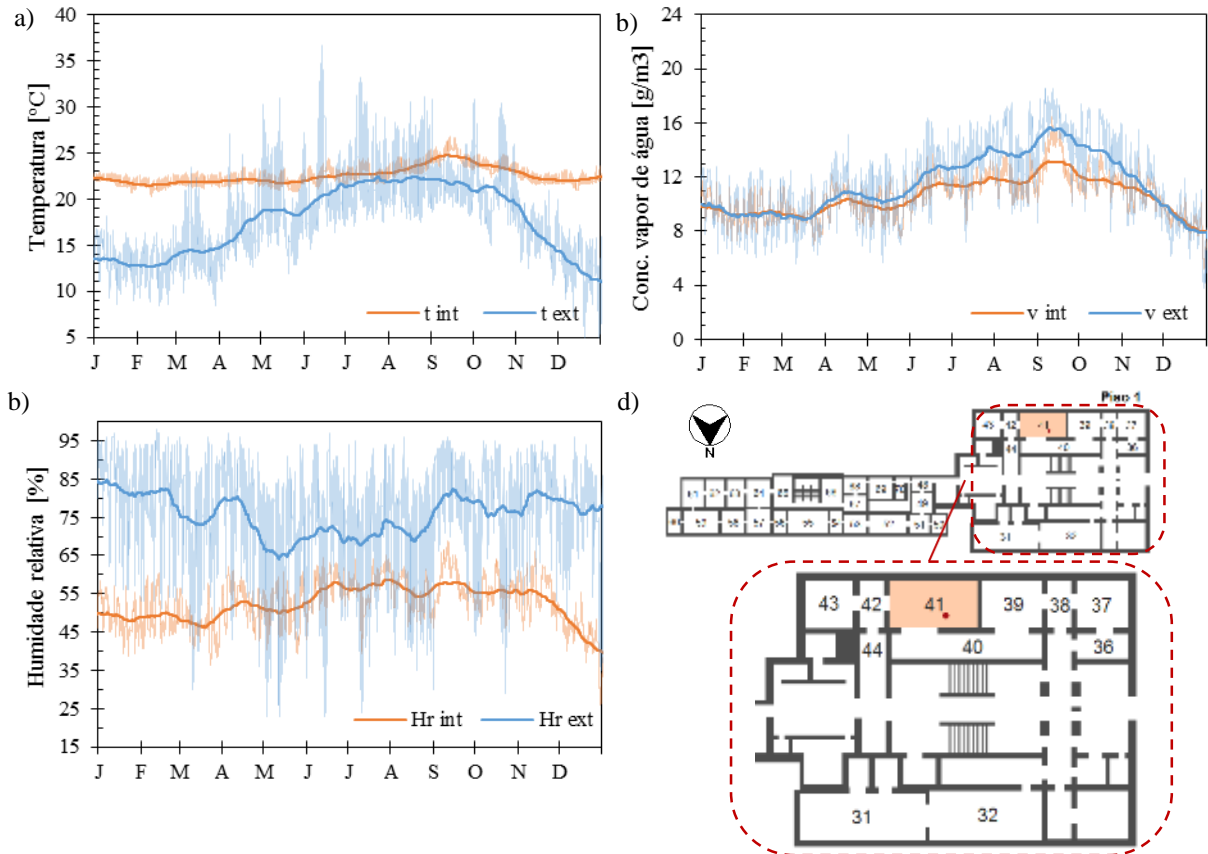


Figura 6.11: Evolução do clima interior da sala 41 no ano de 2014: a) Temperatura; b) Concentração de vapor de água; c) Humidade relativa. Os registos horários encontram-se representados pelas cores com maior transparência e os ciclos sazonais pelas cores mais fortes; d) Planta do piso -1, com indicação da sala 41.

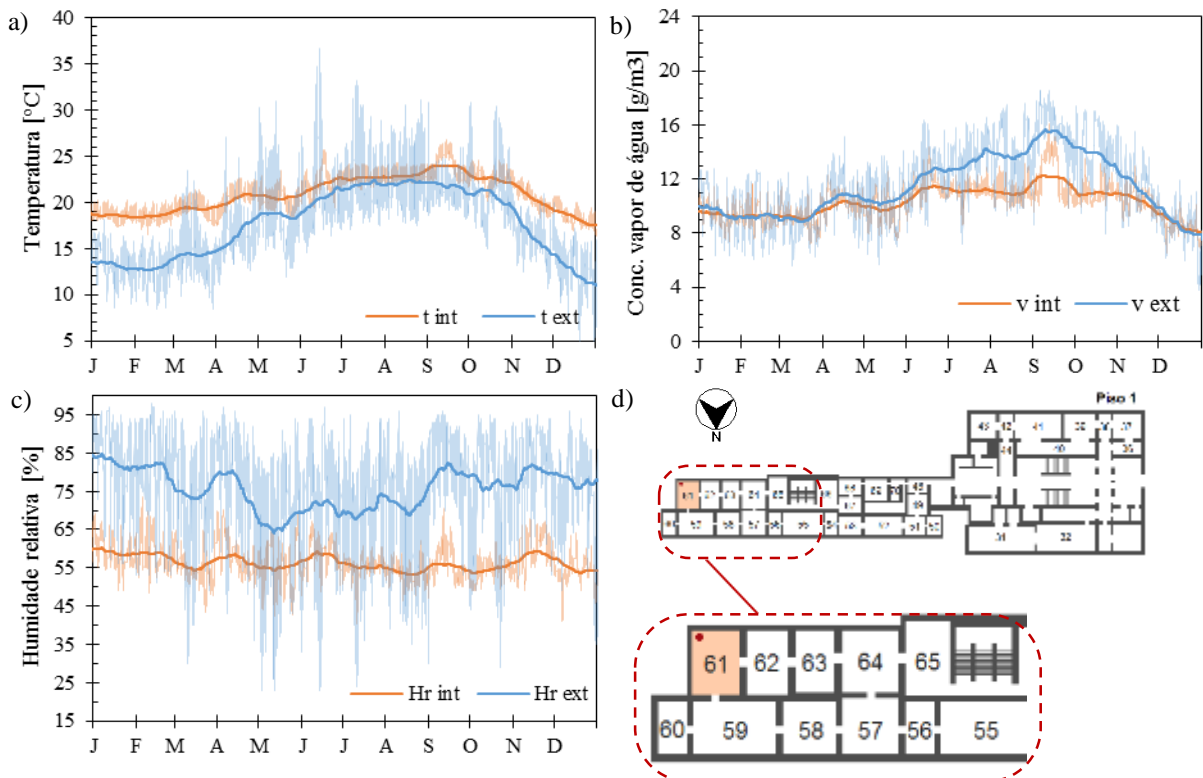


Figura 6.12: Evolução do clima interior da sala 61 no ano de 2014: a) Temperatura; b) Concentração de vapor de água; c) Humidade relativa. Os registos horários encontram-se representados pelas cores com maior transparência e os ciclos sazonais pelas cores mais fortes; d) Planta do piso -1, com indicação da sala 61.

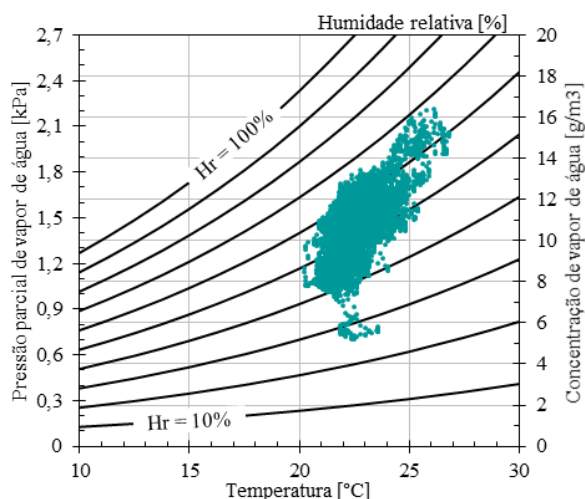


Figura 6.13: Representação, no diagrama psicrométrico, dos valores de temperatura e humidade relativa da sala 41.

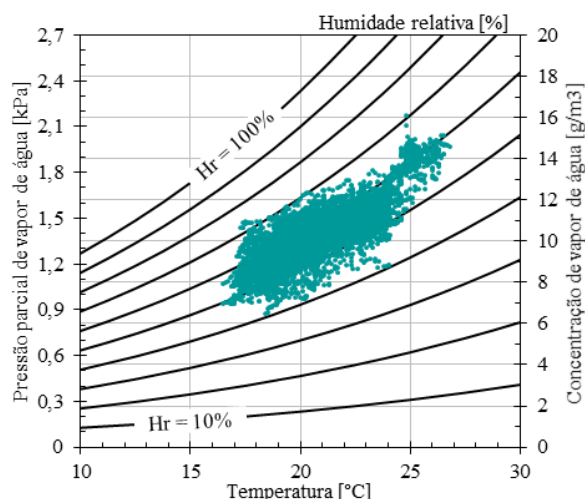


Figura 6.14: Representação, no diagrama psicrométrico, dos valores de temperatura e humidade relativa pertencentes à sala 61.

A solução construtiva do edifício, com paredes exteriores de elevada espessura e grande massa, sugeria que fosse possível verificar o efeito da inércia térmica no interior do museu. No entanto, através da análise dos dados referentes às salas de exposição constatou-se que tal não se verificou, o que pode ser justificado pela presença do sistema de climatização. No geral os valores interiores são superiores aos exteriores no Inverno. No entanto, no Verão as temperaturas apresentam valores mais próximos. Os registos de temperatura interior não apresentam qualquer padrão de variação, mantendo-se razoavelmente constantes, o que se justifica pela existência de um ambiente controlado.

Nos meses de Outono e Inverno a humidade relativa interior parece ser controlada pelo aumento da temperatura, pois os valores da concentração de vapor água interior sobrepõem-se aos exteriores. No período de Verão, verifica-se que as temperaturas interiores estão bastante próximas das exteriores. Por sua vez, a concentração de vapor de água interior apresenta valores mais baixos relativamente aos exteriores, o que parece indicar a presença de um desumidificador de ar.

6.2.2. Salas de reserva

Através da análise das Figuras 6.15 e 6.16 é possível comparar a evolução da temperatura (a), concentração de vapor de água (b) e humidade relativa (c) em termos de registos horários e ciclos sazonais (média móvel a 30 dias) para o exterior e interior das salas de reserva do piso -1: reserva Casa Forte e reserva de pintura, respectivamente, e a sua localização (d).

Na reserva casa forte obteve-se uma temperatura média anual de 21,9 °C, com um valor máximo absoluto de 24,4 °C e um valor mínimo igual a 19,6 °C. Na reserva de pintura registou-se uma temperatura média anual de 21,4 °C, com um valor máximo de 24,5 °C e um valor mínimo igual a 19,0 °C.

No que respeita à humidade relativa, registou-se um valor médio anual de 50,1 % para a reserva Casa Forte e 57,7 % para a reserva de pintura. Relativamente aos valores máximos e mínimos absolutos, registaram-se os pares 60,8/42,6 % para a reserva casa forte e 72,70/35,0 % para reserva de pintura.

Relativamente à concentração de vapor de água, registou-se um valor médio anual de $9,73 \text{ g/m}^3$ para a reserva casa forte e $10,9 \text{ g/m}^3$ para a reserva de pintura. Os valores máximos e mínimos absolutos, registados foram os pares $13,3/8,0 \text{ g/m}^3$ para a reserva casa forte e $14,9/7,8 \text{ g/m}^3$ para a reserva de pintura.

Através da análise dos valores horários de humidade relativa é ainda possível concluir que não existem valores que possam constituir risco de condensações superficiais. Nas Figuras 6.17 e 6.18 é possível visualizar a representação dos valores de temperatura/humidade relativa/concentração de vapor de água da reserva Casa Forte e da reserva de pintura no diagrama psicrométrico, de onde é possível concluir que apenas uma diferença de cerca de $8 \text{ }^\circ\text{C}$ da temperatura superficial face à temperatura do ar na reserva casa forte e $5 \text{ }^\circ\text{C}$ na reserva de pintura poderiam conduzir a condensações superficiais.

Tal como expectável, uma vez que as salas de reserva não estão abertas ao público e permanecem fechadas durante grande parte do tempo, as variações de temperatura e humidade relativa são bastante mais reduzidas comparativamente com as condições verificadas nas salas de exposição.

O comportamento das salas de reserva é semelhante ao das salas de exposição. No entanto, nas primeiras verifica-se uma maior diferença da concentração de vapor de água interior e exterior, que pode ser justificada pela menor ventilação verificada nestas salas.

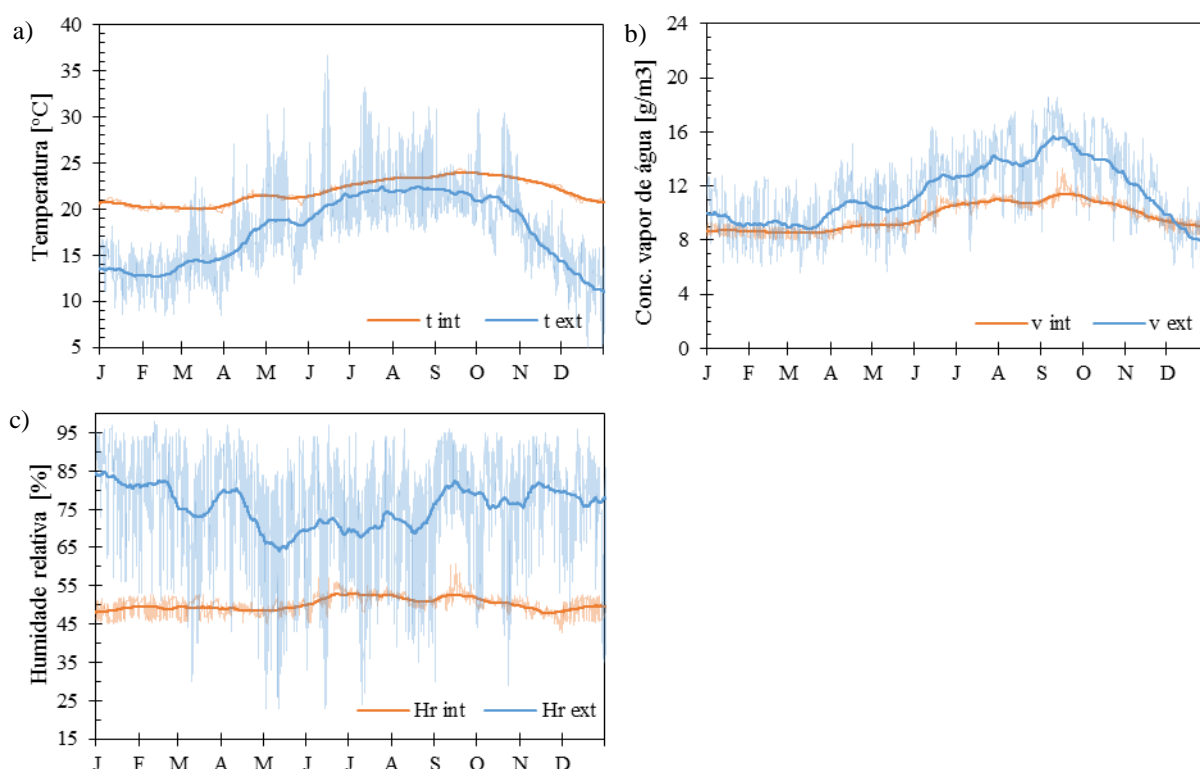


Figura 6.15: Evolução do clima interior da sala de reserva da Casa Forte no ano de 2014: a) Temperatura; b) Concentração de vapor de água; c) Humidade relativa. Os registos horários encontram-se representados pelas cores com maior transparência e os ciclos sazonais pelas cores mais fortes.

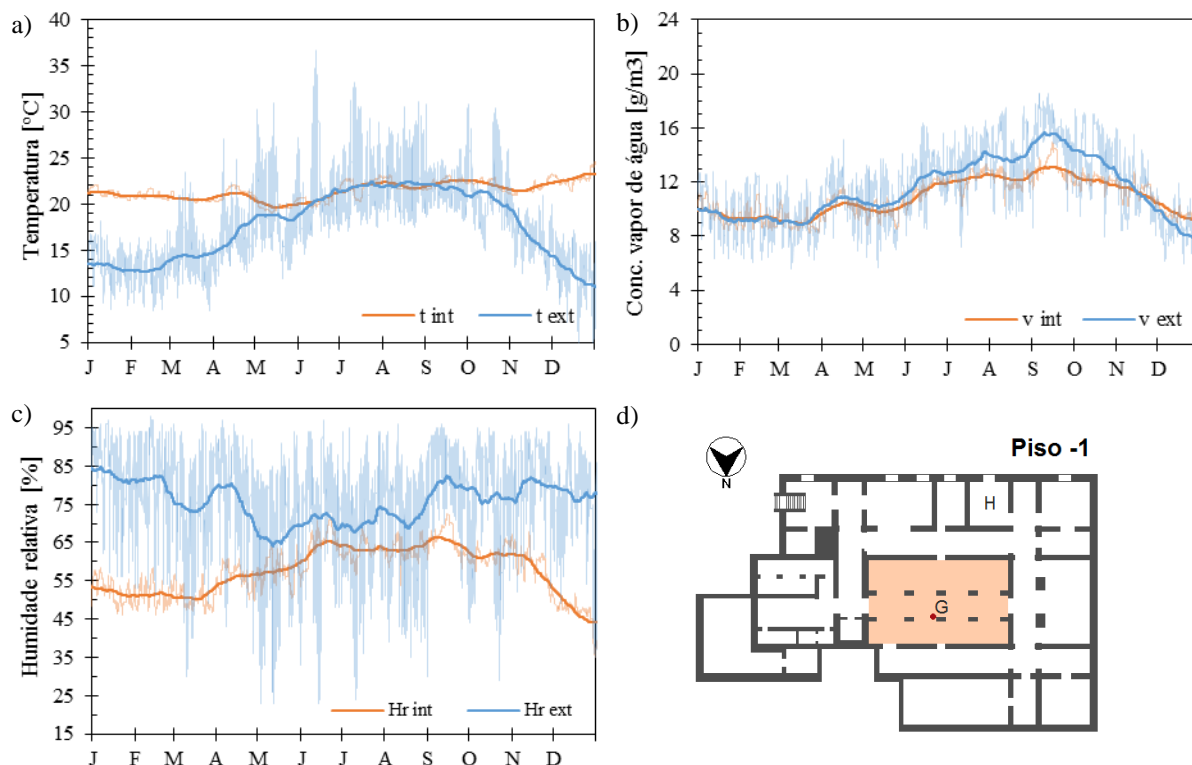


Figura 6.16: Evolução do clima interior da sala de reserva de pintura no ano de 2014: a) Temperatura; b) Concentração de vapor de água; c) Humidade relativa. Os registos horários encontram-se representados pelas cores com maior transparência e os ciclos sazonais pelas cores mais fortes; d) Planta do piso -1, com indicação da sala de reserva de pintura.

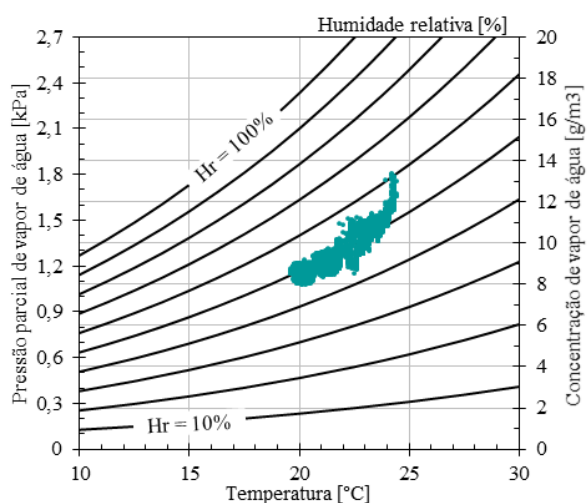


Figura 6.17: Representação, no diagrama psicrométrico, dos valores de temperatura e humidade relativa pertencentes à sala de reserva Casa Forte.

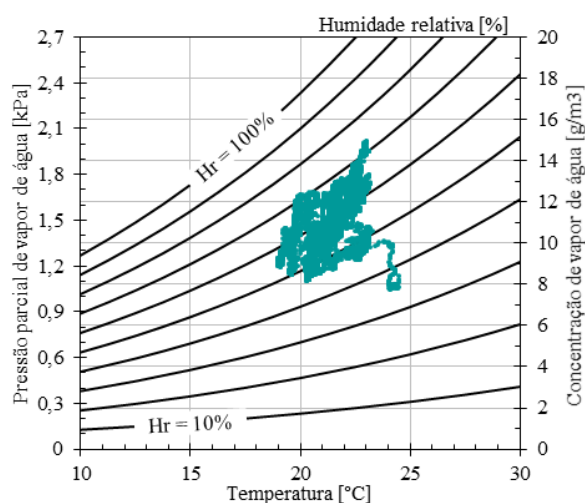


Figura 6.18: Representação, no diagrama psicrométrico, dos valores de temperatura e humidade relativa pertencentes à sala de reserva de pintura.

6.2.3. Salas não controladas

Na Figura 6.19 é possível observar o comportamento da sala de conservação de pintura. Trata-se de uma sala destinada aos trabalhos de conservação e como tal, são usadas diariamente tintas e outros produtos químicos. Devido a isso e como forma de aumentar a ventilação do espaço, as janelas permanecem abertas durante grande parte do dia. Através da análise da Figura 6.19 é possível

comparar a evolução da temperatura (a), concentração de vapor de água (b) e humidade relativa (c), em termos de registos horários e ciclos sazonais (média móvel a 30 dias) para o exterior e interior, e a sua localização (d).

Verificou-se novamente uma maior estabilidade interior, com temperaturas geralmente superiores às exteriores e com menor amplitude de variação. Obteve-se uma temperatura média anual de 21,3 °C, com um valor máximo absoluto de 24,6 °C e um valor mínimo igual a 19 °C.

No que respeita à humidade relativa, registou-se um valor médio anual de 61,6 %, um máximo de 88,2 % e um mínimo de 22 %.

Relativamente à concentração de vapor de água, registou-se um valor médio anual de 11,5 g/m³. Os valores máximos e mínimos absolutos tomaram, respectivamente, valores como 18,9 g/m³ e 4,8 g/m³ para a reserva de pintura.

Comparativamente às outras salas analisadas anteriormente, verificou-se uma maior proximidade entre os valores exteriores e interiores de concentração de vapor de água, que poderá ser justificada pelo facto das janelas permanecerem abertas durante algumas horas do dia. A humidade relativa interior parece ser controlada principalmente pela concentração de vapor de água, aumentando quando esta também aumenta, chegando a apresentar um padrão semelhante. Durante os meses mais quentes verifica-se que os valores de humidade relativa exterior e interior são bastante próximos, o que se justifica pela proximidade entre os valores de concentração de vapor de água e temperatura. Este comportamento difere das restantes salas, em que a humidade relativa durante o Verão parece ser controlada pela diminuição da concentração do vapor de água.

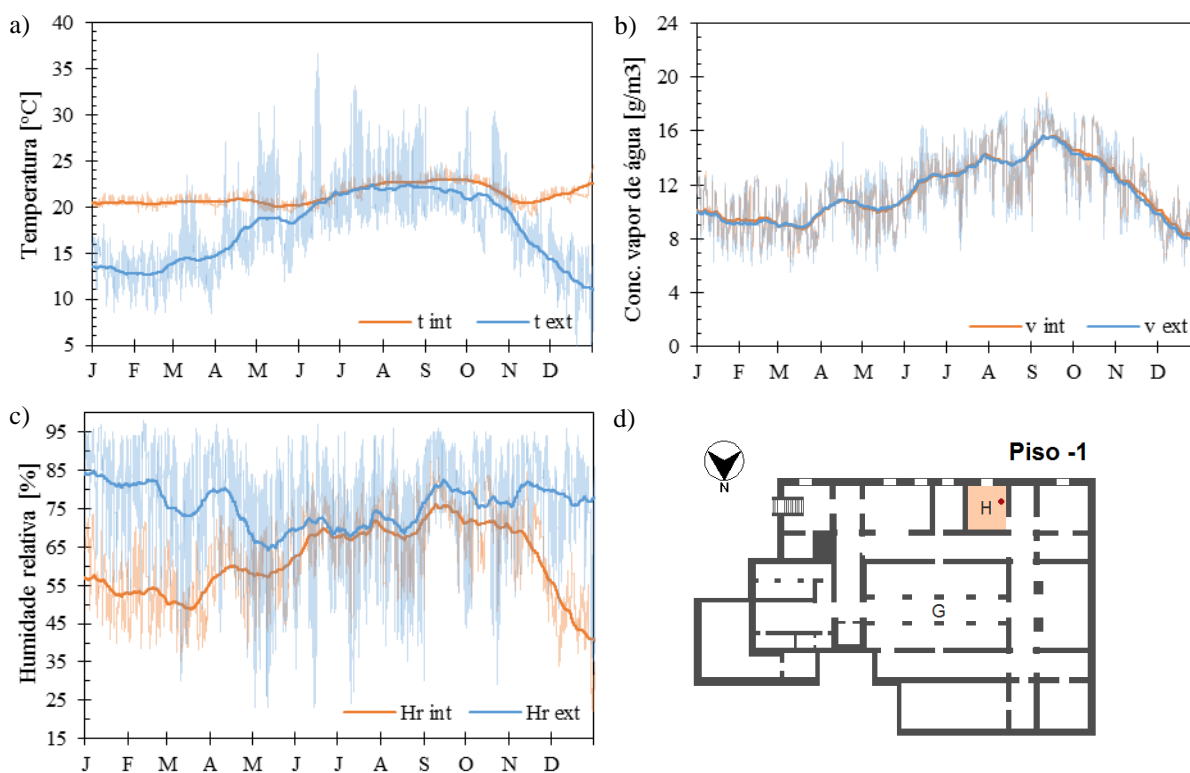


Figura 6.19: Evolução do clima interior da sala de conservação de pintura no ano de 2014: a) Temperatura; b) Concentração de vapor de água; c) Humidade relativa. Os registos horários encontram-se representados pelas cores com maior transparência e os ciclos sazonais pelas cores mais fortes; d) Planta do piso -1, com indicação da sala de conservação de pintura.

Através da representação dos valores de temperatura/humidade relativa/concentração de vapor de água no diagrama psicrométrico (Figura 6.20) é possível verificar que uma diferença de aproximadamente 2,5 °C da temperatura superficial face à temperatura do ar seria suficiente para a ocorrência de condensações superficiais.

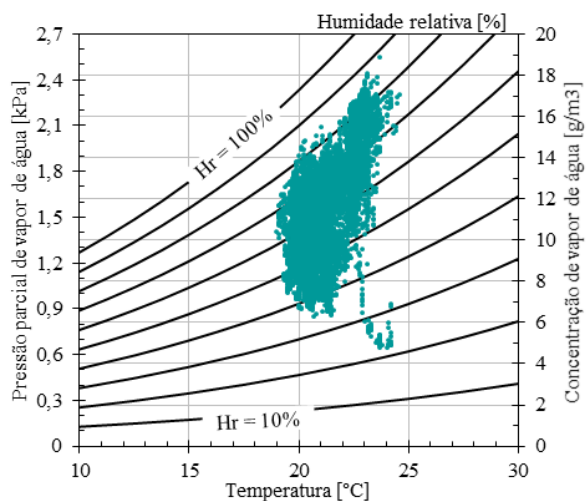


Figura 6.20: Representação, no diagrama psicrométrico, dos valores de temperatura e humidade relativa pertencentes à sala de conservação de pintura.

Através da análise da Figura 6.21 é possível comparar a evolução da temperatura (a), concentração de vapor de água (b) e humidade relativa (c), em termos de registos horários e ciclos sazonais (média móvel a 30 dias) para o exterior e interior da capela das Albertas, e a sua localização em planta (d).

Obteve-se uma temperatura média anual de 19,9 °C, com um valor máximo absoluto de 23,6 °C e um valor mínimo igual a 14,7 °C.

No que respeita à humidade relativa, registou-se um valor médio anual de 62,2 %, um máximo de 74,9 % e um mínimo de 47,1 %.

Em relação à concentração de vapor de água, registou-se um valor médio anual de 10,7 g/m³. Os valores máximos e mínimos absolutos registados foram, respectivamente, 15,9 g/m³ e 5,96 g/m³.

Tal como seria de esperar e à semelhança dos restantes espaços do Museu, tanto para a temperatura como para a humidade relativa observam-se variações horárias exteriores com amplitudes bastante maiores que as interiores, testemunhando-se uma maior estabilidade interior. Como se trata de um espaço não climatizado pertencente a um edifício antigo era expectável que efeito da inércia térmica sob o clima interior fosse notório, verificando-se um amortecimento e desfasamento do ciclo interior face ao exterior, no entanto tal fenómeno não se observa. Este facto poderá ser justificado pela possibilidade de o clima interior da Capela ser influenciado pelo clima do Museu, devido à ligação existente entre os dois e pela fraca ventilação do espaço.

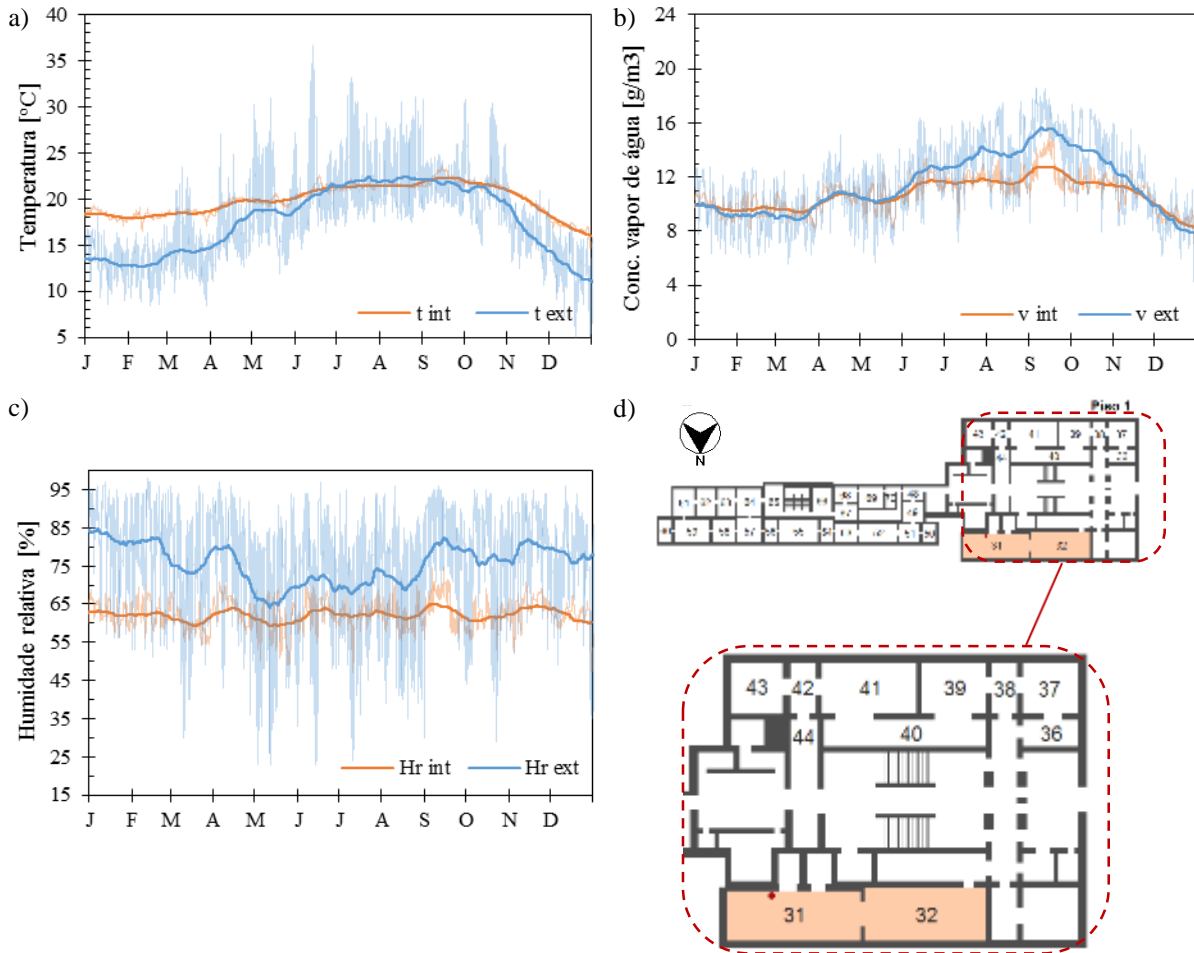


Figura 6.21: Evolução do clima interior da Capela das Albertas no ano de 2014: a) Temperatura; b) Concentração de vapor de água; c) Humidade relativa. Os registos horários encontram-se representados pelas cores com maior transparência e os ciclos sazonais pelas cores mais fortes; d) Planta do piso 1, com indicação da Capela das Albertas.

Através da análise dos valores horários de humidade relativa é ainda possível concluir que não existem valores que possam constituir risco de condensações superficiais. Na Figura 6.22 é possível visualizar a representação dos valores de temperatura/humidade relativa/concentração de vapor de água no diagrama psicrométrico, de onde é possível concluir que apenas uma diferença de cerca de 5,5 °C da temperatura superficial face à temperatura do ar poderia conduzir a condensações superficiais.

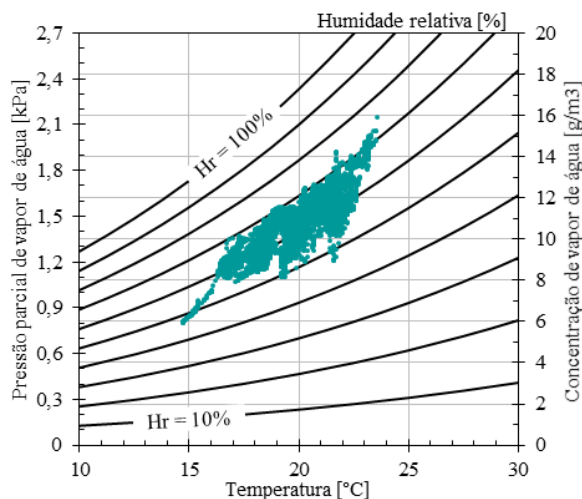


Figura 6.22: Representação, no diagrama psicrométrico, dos valores de temperatura e humidade relativa pertencentes à Capela das Albertas.

6.3. Análise da influência da orientação e exposição

A orientação das fachadas e a disposição das salas são parâmetros que influenciam a temperatura interior, tanto pela radiação, como pela exposição ao vento e chuva.

Na Figura 6.23 encontra-se representado o comportamento higrotérmico sazonal de uma sala orientada a Norte (sala 16) e de uma sala orientada a Sul (sala 25). Apesar da presença de um sistema de climatização as solicitações exteriores parecem ter alguma influência no comportamento interior, na medida em que a sala 16, orientada a Norte, recebe menos radiação solar, apresentando temperaturas inferiores comparativamente à sala 25, orientada a Sul. Relativamente à humidade relativa, verifica-se o oposto, pois uma vez que os valores de concentração de vapor de água praticamente não se alteram, um aumento da temperatura traduz-se numa redução da humidade relativa.

Na Figura 6.24 é possível visualizar o ciclo sazonal da sala 13 e da sala 11, ambas situadas no piso 3. Esta análise tem o objectivo de comparar o comportamento higrotérmico de uma sala interior (sala 13) e de uma sala que tem a maioria das fachadas em contacto com o exterior (sala 11). A sala 11 parece ser mais influenciada pelas solicitações exteriores, pois comparativamente com a sala 13, apresenta temperaturas superiores nos meses mais quentes e temperaturas mais baixas nos meses mais frios.

Através da Figura 6.25 é possível comparar o comportamento higrotérmico de duas salas com a mesma orientação mas situadas em pisos diferentes. A sala 25 situa-se no piso 2 e a sala 41 situa-se no piso 1 (Figura 6.25 - d). Apesar de se tratarem de pisos intermédios, é possível visualizar que a sala 25 que se localiza num piso superior, apresenta temperaturas superiores durante o Verão comparativamente com sala 41, situada no piso abaixo. Como era de esperar, verifica-se que os valores de humidade relativa das duas salas são coincidentes durante os meses de Inverno, pois os valores de temperatura e concentração de vapor de água também o são. No entanto, para o restante período de tempo verifica-se que a sala do piso inferior apresenta maiores valores de humidade relativa que podem ser justificados pelas temperaturas mais baixas, pois os valores da concentração de vapor de água das duas salas são semelhantes.

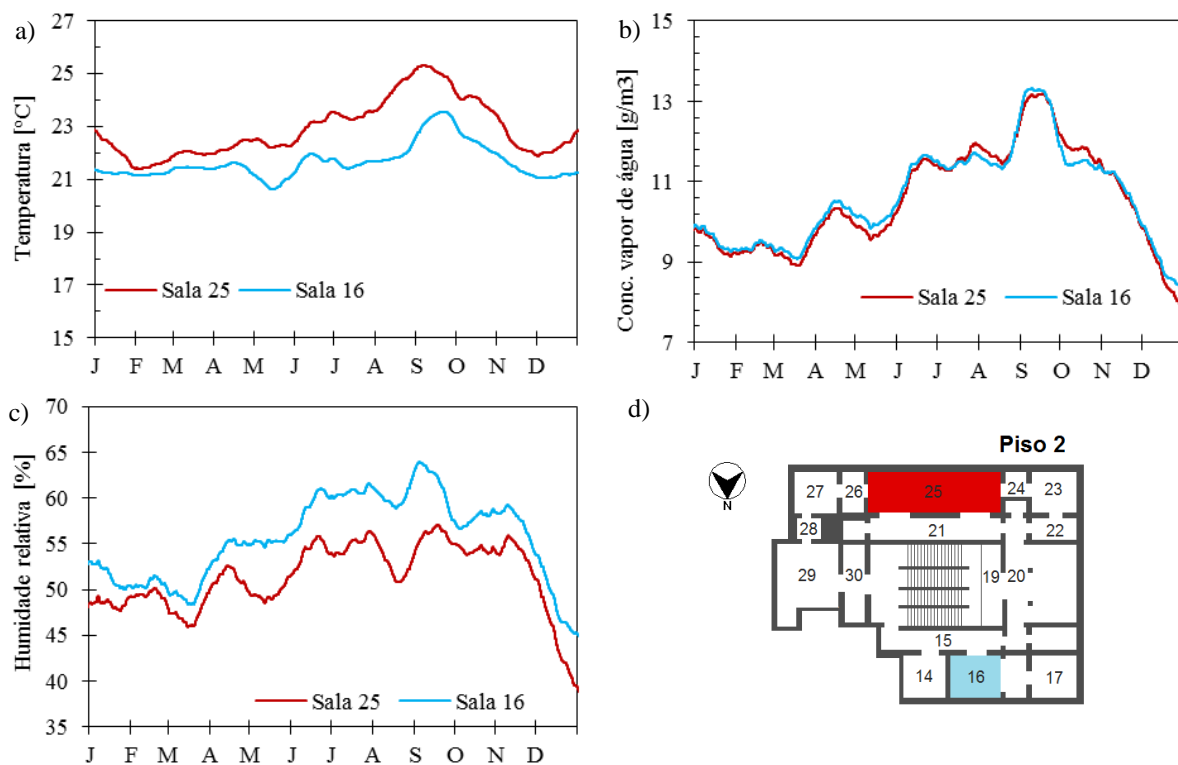


Figura 6.23: Evolução do clima interior da sala 25 e 16: a) Temperatura; b) Concentração de vapor de água; c) Humidade relativa; d) Planta do piso 2, com indicação da sala 25 e 16.

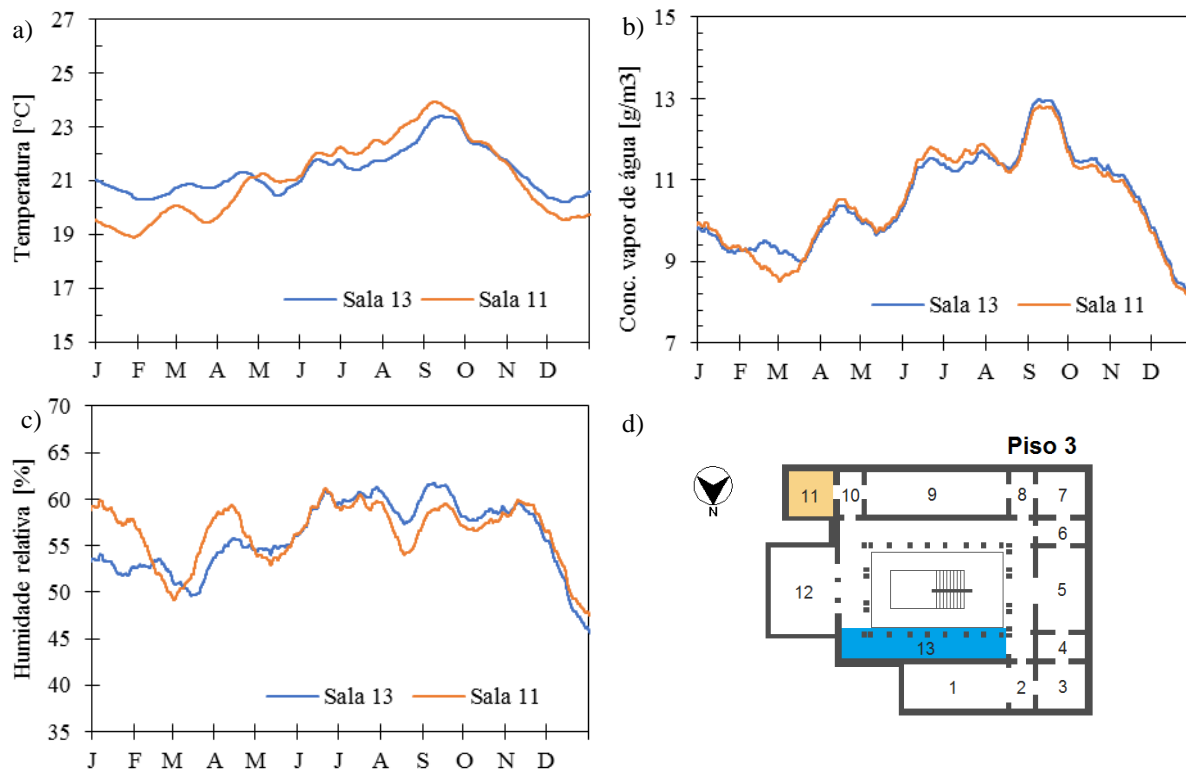


Figura 6.24: Evolução do clima interior da sala 13 e 11: a) Temperatura; b) Concentração de vapor de água; c) Humidade relativa; d) Planta do piso 3, com indicação da sala 13 e 11.

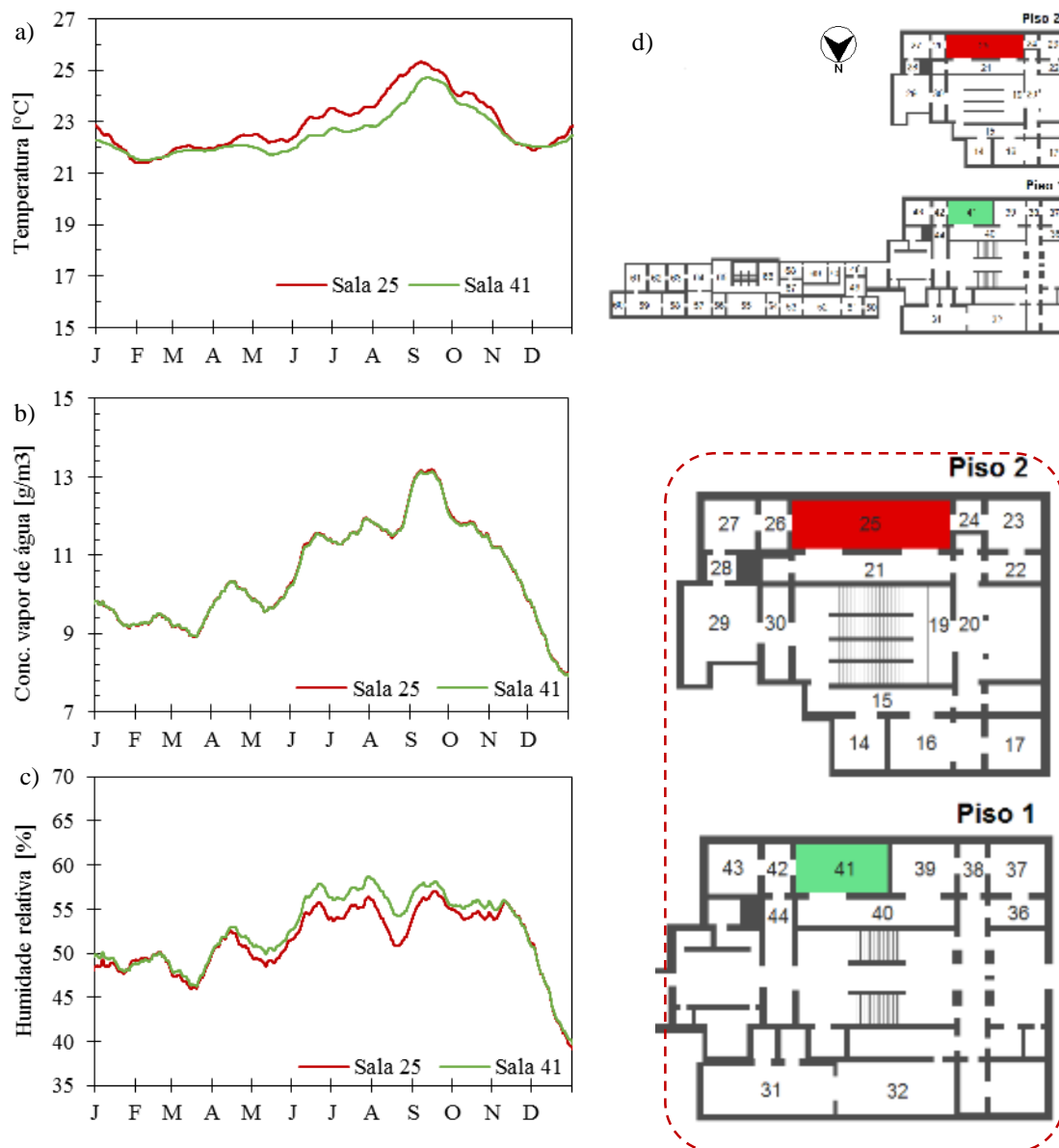


Figura 6.25: Evolução do clima interior das salas 25 e 41: a) Temperatura; b) Concentração de vapor de água; c) Humidade relativa; d) Planta do piso 2 e 1, com indicação da sala 25 e 41.

6.4. Ciclos diários

Nesta secção efectuou-se uma análise aos ciclos diários, definidos como a máxima amplitude diária de temperatura e humidade relativa do ar e calculou-se os valores típicos limitados pelo 90^o percentil dos valores obtidos.

As Figuras 6.26 a 6.36 apresentam os pares de amplitudes diárias de temperatura e humidade relativa durante o ano de 2014 e os respectivos valores típicos.

6.4.1. Salas de exposição

Para a sala 13 (Figura 6.26) verificou-se que o limite do ciclo típico diário de temperatura toma o valor de 0,7 °C e o limite do ciclo de humidade relativa 11,9 %. A sala 12 (Figura 6.27) assume uma amplitude diária típica de 0,9 °C para a temperatura e 11 % para a humidade relativa. A sala 11 (Figura 6.28) regista os limites mais elevados do conjunto destas três salas de exposição do piso 3, com um valor de 1,0 °C para a temperatura e 12,3 % para a humidade relativa. O clima exterior parece ter alguma influência sob o ambiente anterior, na medida em que a sala 11, que tem três faces em contacto com o exterior e uma delas está orientada a Sul, apresenta maiores amplitudes comparativamente com a sala 13, considerada uma sala interior.

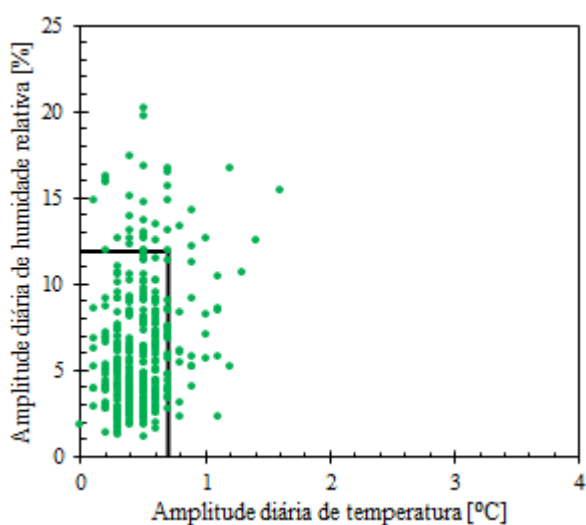


Figura 6.26: Amplitude para os ciclos diários de temperatura e humidade relativa na sala 13.

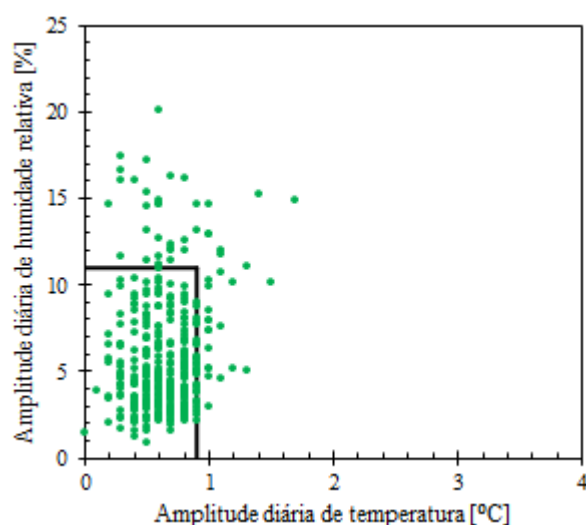


Figura 6.27: Amplitude para os ciclos diários de temperatura e humidade relativa na sala 12.

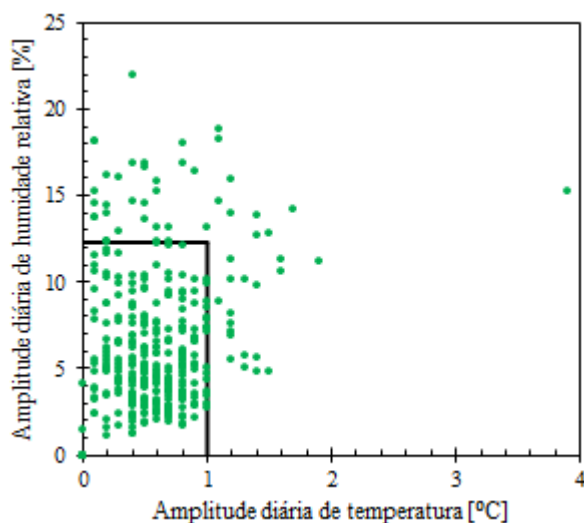


Figura 6.28: Amplitude para os ciclos diários de temperatura e humidade relativa na sala 11.

Nas Figuras 6.29 e 6.30 é possível observar as amplitudes diárias típicas referentes às salas de exposição do piso 2. Para a sala 16 verifica-se que os limites dos ciclos típicos tomam valores de 1,1 °C para a temperatura e 10,9 % para a humidade relativa. No caso da sala 25 as amplitudes típicas

dos dois parâmetros são ligeiramente superiores comparativamente aos valores da sala 16, obtendo-se um valor de 2,6 °C para a temperatura e 12,3 % para a humidade relativa.

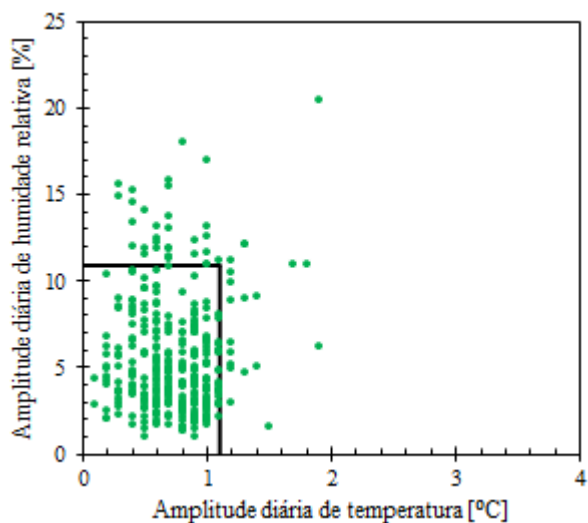


Figura 6.29: Amplitude para os ciclos diários de temperatura e humidade relativa na sala 16.

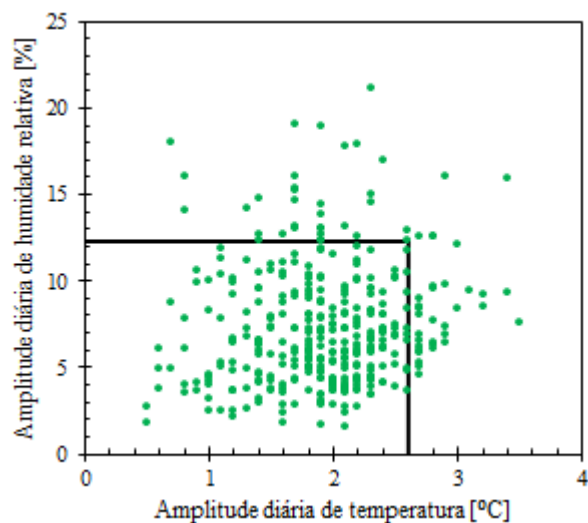


Figura 6.30: Amplitude para os ciclos diários de temperatura e humidade relativa na sala 25.

As Figuras 6.31 e 6.32 dizem respeito às salas 41 e 61, sendo possível verificar que na sala 41 as amplitudes típicas de temperatura e humidade relativa tomam valores de 1,6 °C e 9,9 %, respectivamente. A sala 61, por sua vez, regista valores superiores, 2,2 °C no caso da temperatura e 10,1 % para a humidade relativa.

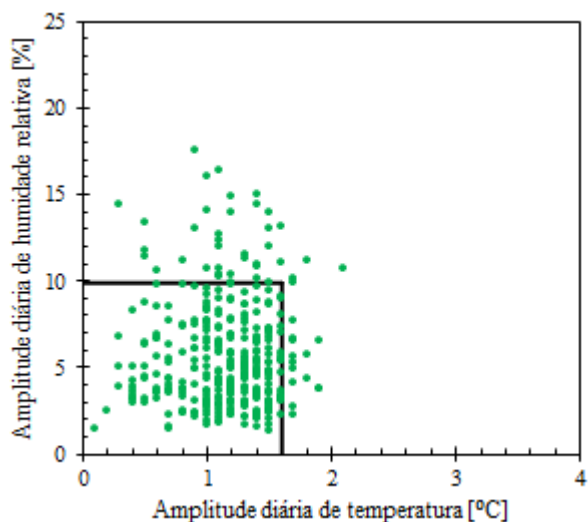


Figura 6.31: Amplitude para os ciclos diários de temperatura e humidade relativa na sala 41.

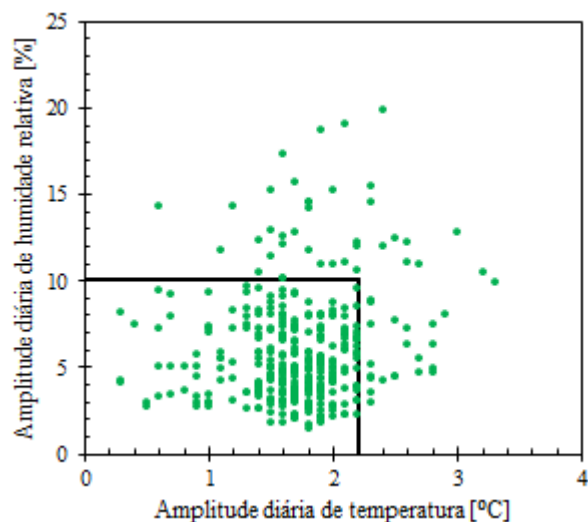


Figura 6.32: Amplitude para os ciclos diários de temperatura e humidade relativa na sala 61.

6.4.2. Salas de reserva

As Figuras 6.33 e 6.34 dizem respeito às salas de reserva, nomeadamente a reserva Casa Forte e a reserva de pintura. Tal como expectável, ambas as salas apresentam amplitudes diárias de temperatura e humidade relativa bastante reduzidas. Estes valores podem ser justificados pela baixa taxa de ventilação e pelo facto das salas não estarem abertas ao público, permanecendo fechadas durante

grande parte do tempo. Na sala de reserva Casa Forte verifica-se uma amplitude típica de 0,3 °C para a temperatura e 5,4 % para a humidade relativa. No caso da sala de reserva de pintura estes parâmetros tomam os valores de 0,5 °C para a temperatura e 5,2 % para a humidade relativa.

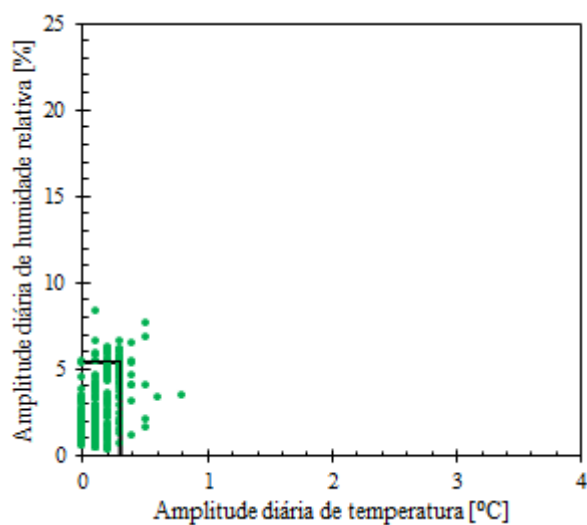


Figura 6.33: Amplitude para os ciclos diários de temperatura e humidade relativa na reserva Casa Forte.

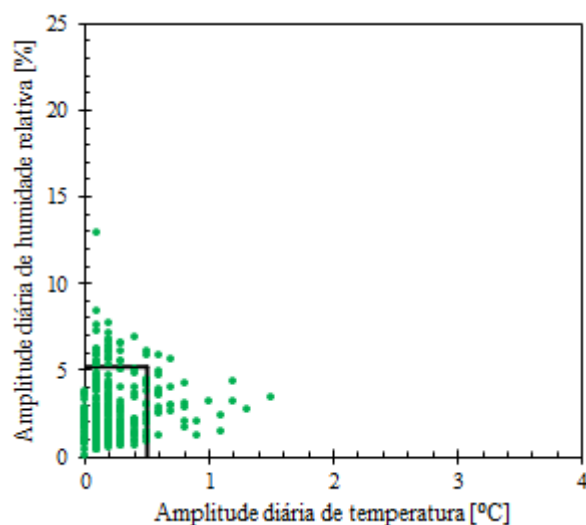


Figura 6.34: Amplitude para os ciclos diários de temperatura e humidade relativa na reserva de pintura.

6.4.3. Salas não controladas

As Figuras 6.35 e 6.36 dizem respeito às salas não controladas, nomeadamente a sala de conservação de pintura e a Capela das Albertas.

A sala de conservação de pintura apresenta as maiores amplitudes de humidade relativa registadas em todo o Museu. Como já mencionado anteriormente, trata-se de uma sala onde as janelas permanecem abertas durante grande parte do dia, o que faz com que os valores de concentração de vapor de água variem em larga escala e influenciem a humidade relativa. Como se pode verificar pela Figura 6.35, os ciclos diários típicos de humidade relativa tomam o valor de 18,5 %, enquanto o valor típico de temperatura está na ordem de 1,3 °C.

A Capela das Albertas, tal como foi referido anteriormente, não é climatizada, no entanto a influência que o clima do Museu exerce sobre esta sala volta a ser visível na amplitude dos ciclos diários. Na Figura 6.36 apresentam-se as amplitudes dos ciclos diários típicos de temperatura e humidade relativa registados na Capela das Albertas. As amplitudes típicas de temperatura e humidade relativa tomam, respectivamente, os valores de 0,6 °C e 7,9 %.

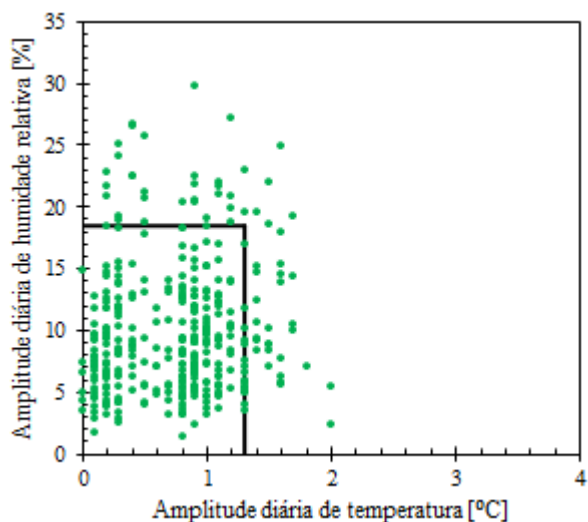


Figura 6.35: Amplitude para os ciclos diários de temperatura e umidade relativa na sala de conservação de pintura

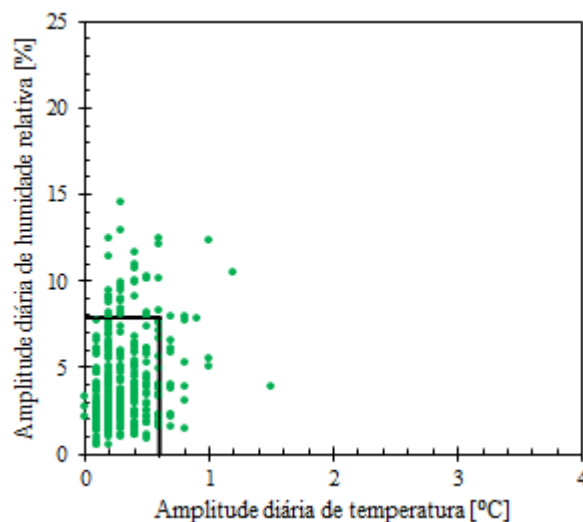


Figura 6.36: Amplitude para os ciclos diários de temperatura e umidade relativa na Capela das Albertas.

6.5. Índice de desempenho

O índice de desempenho (ID) representa a percentagem de tempo em que os requisitos impostos são cumpridos. Recorda-se que são impostos limites inferiores e superiores tanto para a temperatura (20-22 °C) como para a umidade relativa (50-60 %).

6.5.1. Salas de exposição

Começou-se por analisar as salas de exposição do piso 3 do Museu. Nas Figuras 6.37, 6.38 e 6.39 encontra-se representado o desempenho do clima interior das salas 13, 12 e 11, respectivamente, em termos de temperatura e umidade relativa.

O índice de desempenho da sala 13 toma o valor de 36,4 %, ou seja, o clima interior desta sala cumpre simultaneamente os requisitos impostos para a temperatura e umidade relativa em 36,4 % do tempo. Considerando a temperatura e a umidade relativa isoladamente, verifica-se que os dois parâmetros são cumpridos, respectivamente, em 72,4 e 53,8 % do tempo. A percentagem de tempo em que esta sala se apresenta demasiado seca e demasiado húmida toma valores significativos, respectivamente, 17,5 % e 18,5 %.

O clima interior da sala 12 apresenta-se demasiado quente em 27,3 % do tempo, cumprindo os requisitos impostos em 26,3 %. Os limites impostos para a temperatura são satisfeitos em 42,5 % do tempo, enquanto para a umidade relativa este valor é de 68,3 %.

À semelhança da sala 12, também a sala 11 apresenta a maior percentagem para um clima demasiado quente (21,2 %), cumprindo os requisitos apenas em 17,3 % do tempo. Os valores de temperatura situam-se dentro dos limites impostos em 40,4 % do tempo e a umidade relativa é cumprida em 55,4% do tempo.

A sala 13 é a que cumpre os requisitos impostos durante mais tempo, comparativamente com as restantes salas pertencentes ao mesmo piso. Este resultado pode ser justificado pela sua localização,

ou seja, por se tratar de uma zona interior onde nenhuma das suas paredes está em contacto com o exterior, apresenta um clima mais estável.

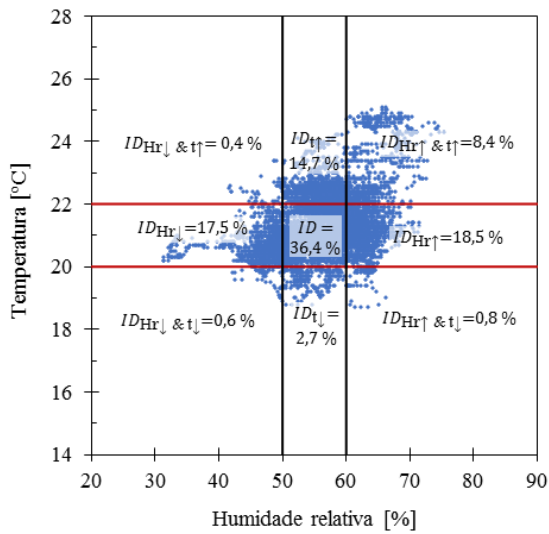


Figura 6.37: Desempenho do clima interior da sala 13.

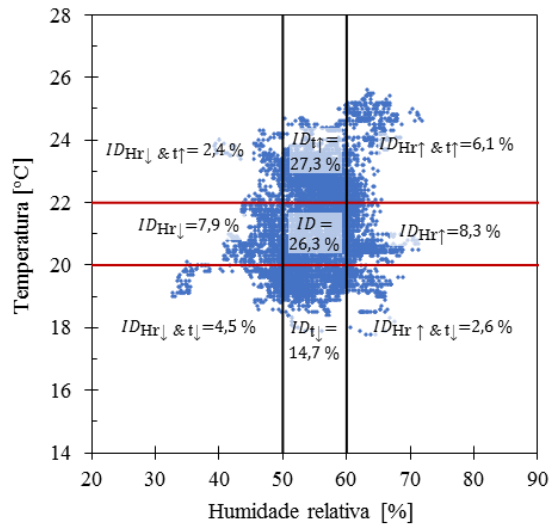


Figura 6.38: Desempenho do clima interior da sala 12.

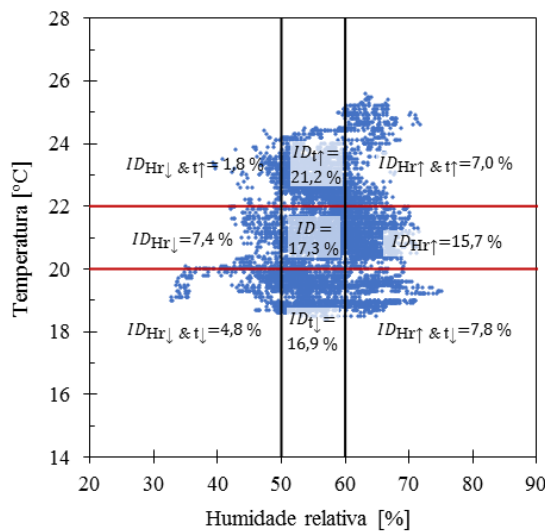


Figura 6.39: Desempenho do clima interior da sala 11.

As Figuras 6.40 e 6.41 dizem respeito, respectivamente, à sala 16 e 25 - zonas de exposição pertencentes ao piso 2.

Relativamente à sala 16, pode-se verificar que se encontra bastante controlada em termos de temperaturas, cumprindo os limites em 75,8 % do tempo. Os valores de humidade relativa são satisfeitos em 50,6 % do tempo. Assim, para esta sala o índice de desempenho é de 36,3 %, ao passo que na sala 25 o cumprimento dos requisitos é apenas de 13,4 %. Pode-se verificar que a maior concentração de pontos temperatura/humidade relativa se situa no quadrante que corresponde a um clima demasiado quente, o que pode ser justificado pela localização da sala a sul. Os valores de temperatura são cumpridos em 33,2 % do tempo, enquanto a humidade relativa é cumprida durante 50 % do tempo.

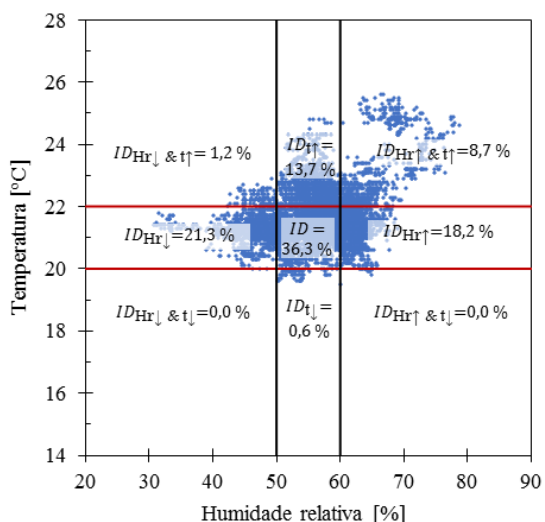


Figura 6.40: Desempenho do clima interior da sala 16.

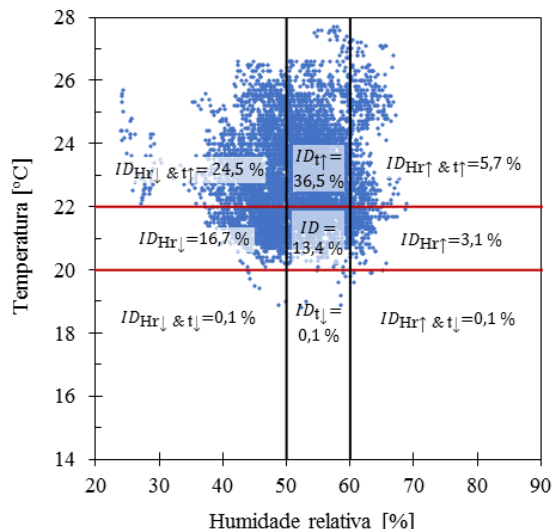


Figura 6.41: Desempenho do clima interior da sala 25.

Nas Figuras 6.42 e 6.43 encontra-se representado o comportamento interior das salas de exposição do piso 1. Para ambas é possível verificar que o clima interior cumpre simultaneamente os requisitos impostos à temperatura e humidade relativa em 17,4 %. No entanto, para a sala 41 é visível que a maior concentração de pares temperatura/humidade relativa ocorre nos quadrantes superiores, correspondendo a um clima considerado quente. Os limites de temperatura e humidade relativa são cumpridos, respectivamente, em 40,7 % e 53,5 % do tempo. Ao passo que para a sala 61, os valores de temperatura e humidade relativa são satisfeitos em 24,3 % e 73,4 %, respectivamente. A concentração de pares temperatura/humidade relativa ocorre em maior percentagem nos quadrantes correspondentes a um clima demasiado quente e demasiado frio.

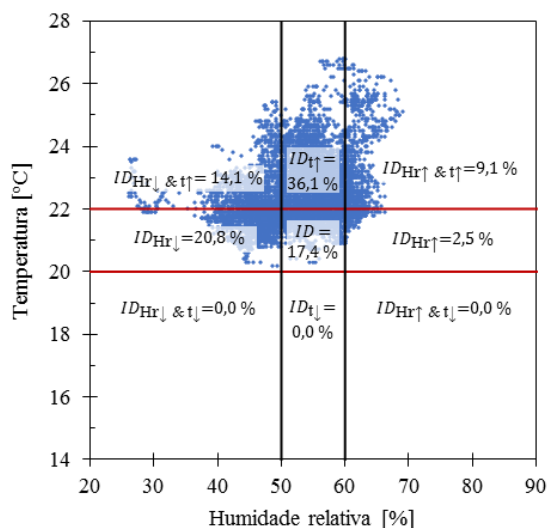


Figura 6.42: Desempenho do clima interior da sala 41.

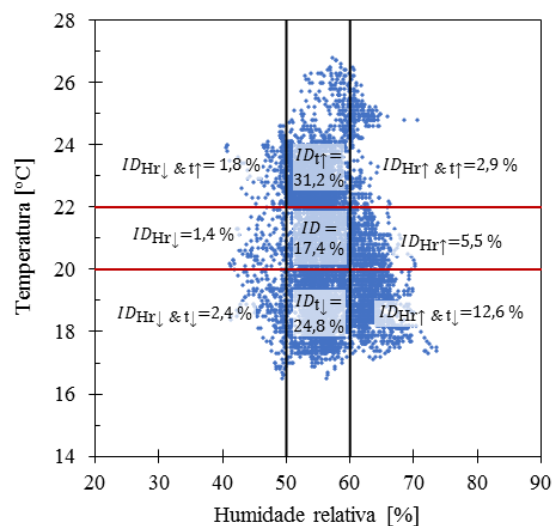


Figura 6.43: Desempenho do clima interior da sala 61.

6.5.2. Salas de reserva

Nas Figuras 6.44 e 6.45 encontra-se representado o índice de desempenho para as salas de reserva. É possível verificar que para a sala de reserva Casa Forte foi obtido um índice de desempenho de apenas 15,6 %. Os valores impostos à temperatura são cumpridos em 47,5 % do tempo e os de humidade relativa em 55,7 %.

A sala de reserva de pintura cumpre simultaneamente os limites impostos à temperatura e humidade relativa em 27,3 % do tempo. As temperaturas são satisfeitas em 60 % e a humidade relativa em 37,6 % do período de tempo analisado.

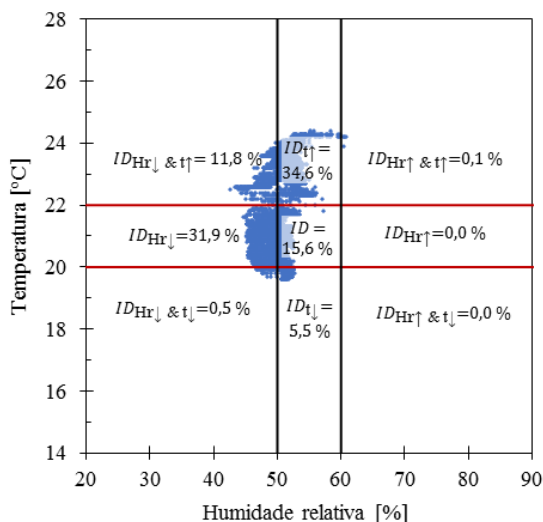


Figura 6.44: Desempenho do clima interior da sala de reserva Casa Forte.

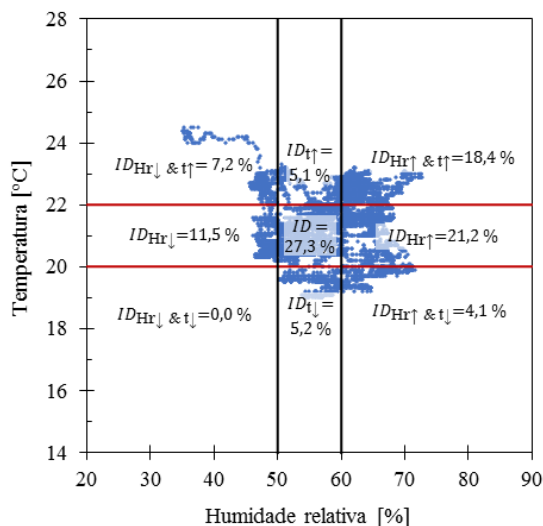


Figura 6.45: Desempenho do clima interior da sala de reserva pintura.

6.5.3. Salas não controladas

O índice de desempenho da sala de conservação é de 18,3 % (Figura 6.46), sendo que este valor é em grande parte influenciado pela grande variação de humidade relativa, uma vez que os limites impostos a este parâmetro apenas se cumprem em 23,9 % do tempo. A temperatura é satisfeita em 62,2 % do tempo de estudo.

Por fim, apresenta-se na Figura 6.47 o desempenho do clima interior para a Capela das Albertas. Note-se que neste espaço não está instalado o sistema de climatização, sendo apenas influenciado pelo clima do Museu e como tal já era de esperar que o índice de desempenho global não fosse elevado. Este índice toma o valor de 12,1 %. Embora o ambiente não seja controlado, a temperatura encontra-se dentro dos limites impostos ao Museu em 44,9 % e a humidade relativa em 27,4 % do tempo.

Verifica-se que de uma maneira geral, apesar dos limites de temperatura e humidade relativa impostos pelo Museu, estes parecem não ser cumpridos em percentagens satisfatórias.

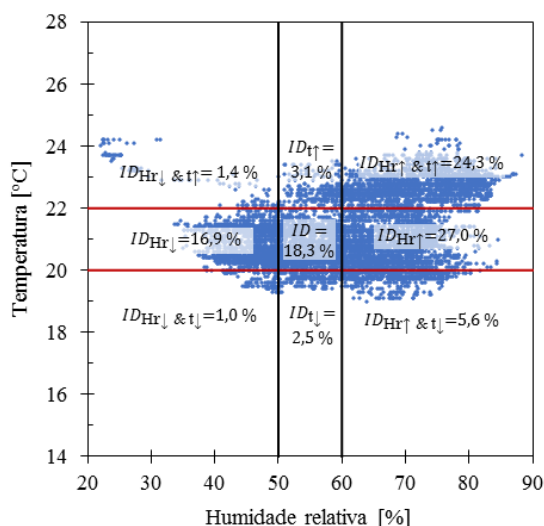


Figura 6.46: Desempenho do clima interior da sala de conservação de pintura.

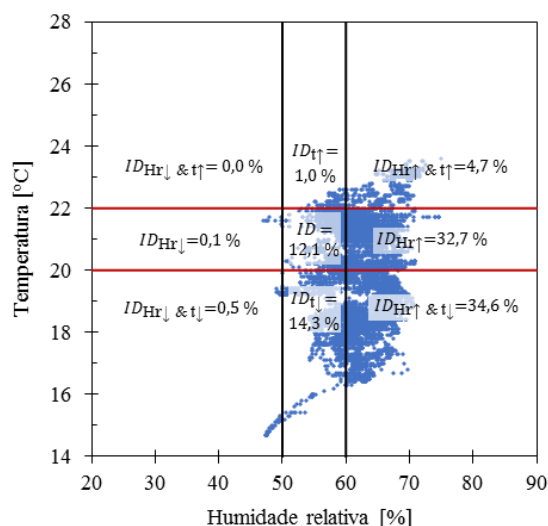


Figura 6.47: Desempenho do clima interior da Capela das Albertas.

6.6. Especificação ASHRAE

Analisado o comportamento geral do clima interior do Museu Nacional de Arte Antiga e avaliada a eficiência do sistema de climatização, decidiu-se efectuar uma análise baseada no risco de degradação associado aos valores de temperatura e humidade relativa registados em cada sala. Para tal, optou-se por utilizar a especificação desenvolvida pela ASHRAE e presente no capítulo 21 do seu manual [29].

São definidas várias classes climáticas que dizem respeito a certos intervalos de temperatura e humidade relativa mais ou menos exigentes, consoante a classe pretendida. Para cada classe foi seguida a metodologia descrita no ponto 5.5.3 e determinadas as bandas de temperatura e humidade relativa admitidas para cada classe. Posteriormente, foi possível calcular a percentagem de valores de temperatura e humidade relativa que se encontram, simultaneamente, dentro das respectivas bandas.

6.6.1. Salas de exposição

A análise das Figuras 6.48 a 6.54 permite verificar a percentagem de tempo em que os limites de temperatura e humidade relativa definidos por cada classe são cumpridos para as salas de exposição.

A classe AA, que não permite variações sazonais de humidade relativa e limita as variações sazonais de temperatura a ± 5 °C, permitindo flutuações de curta duração de ± 2 °C para a temperatura e ± 5 % para a humidade relativa, é cumprida em 53,5 % do tempo para a sala 13 (Figura 6.48), em 67,5 % para a sala 12 (Figura 6.49), em 55,2 % para a sala 11 (Figura 6.50), em 51,6 % para a sala 16 (Figura 6.51), em 55,5 % para a sala 25 (Figura 6.52), em 52,4 % para a sala 41 (Figura 6.53) e em 70,1% para a sala 61 (Figura 6.54). Verificou-se que a percentagem de tempo em que a temperatura é cumprida varia entre 97,4 % para a sala 61 e 99,9 % para a sala 41 e entre 51,7 % e 72,4 % para a humidade relativa, nas salas 16 e 61, respectivamente.

A classe A, que não permite variações sazonais de humidade relativa e limita as variações sazonais de temperatura a +5 e -10 °C, admitindo flutuações de curta duração de ± 2 °C e ± 10 %, respectivamente, para temperatura e humidade relativa é cumprida em 91,8 % do tempo para a sala 13 (Figura 6.48),

em 94,2 % para a sala 12 (Figura 6.49), em 86,6 % para a sala 11 (Figura 6.50), em 89,0 % para a sala 16 (Figura 6.51), em 88,2 % para a sala 25 (Figura 6.52), em 91,3 % para a sala 41 (Figura 6.53) e em 93,8% para a sala 61 (Figura 6.54). A percentagem de tempo em que a temperatura é cumprida varia entre 97,4 % para a sala 61 e 99,9 % para a sala 41 e encontra-se entre 88,0 % e 96,4 % para a humidade relativa, nas salas 11 e 61, respectivamente.

A classe As, que limita as variações sazonais de humidade relativa e temperatura a, respectivamente, ± 10 % e +5 e -10 °C, permitindo flutuações de curta duração de ± 2 °C para a temperatura e ± 5 % para a humidade relativa é cumprida em 72,4 % do tempo para a sala 13 (Figura 6.48), em 75,1 % para a sala 12 (Figura 6.49), em 66,4 % para a sala 11 (Figura 6.50), em 72,9 % para a sala 16 (Figura 6.51), em 68,3 % para a sala 25 (Figura 6.52), em 75,7 % para a sala 41 (Figura 6.53) e em 78,2% para a sala 61 (Figura 6.54). A temperatura é cumprida entre 97,4 % para a sala 61 e 99,9 % do tempo para a sala 41 e entre 67,1 % e 80,4 % para a humidade relativa, nas salas 11 e 61, respectivamente.

A classe B, que limita as variações sazonais de humidade relativa de ± 10 % e variações de temperatura até +10 °C, mas com valores absolutos inferiores a 30 °C, permitindo flutuações de curta duração de ± 5 °C para a temperatura e ± 10 % para a humidade relativa é cumprida em 97,1 % do tempo para a sala 13 (Figura 6.48), em 97,6 % para a sala 12 (Figura 6.49), em 95,3 % para a sala 11 (Figura 6.50), em 97,3 % para a sala 16 (Figura 6.51), em 96,2 % para a sala 25 (Figura 6.52), em 98,0 % para a sala 41 (Figura 6.53) e em 98,2 % para a sala 61 (Figura 6.54). A temperatura é cumprida na totalidade do tempo em todas as salas e a humidade relativa entre 95,3 % e 98,2 % nas salas 11 e 61, respectivamente.

A classe C, que define que a temperatura raramente deve ser superior a 30 °C e geralmente inferior a 25 °C e que a humidade relativa deve apresentar valores entre 25 e 75 %, é cumprida em 100 % do tempo para todas as salas excepto para as salas 16 e 25, que cumprem em 99,7 % e 99,9 %, respectivamente.

A classe D, que define apenas que a humidade relativa deve apresentar valores inferiores a 75 %, é cumprida durante 100 % do tempo em todas as salas, excepto na sala 16 onde é cumprida em 99,7 % do tempo. Verificou-se a temperatura é cumprida em todas as salas na totalidade do tempo, tal como os valores de humidade relativa, com excepção da sala 16, onde é cumprido em 99,7 % do tempo.

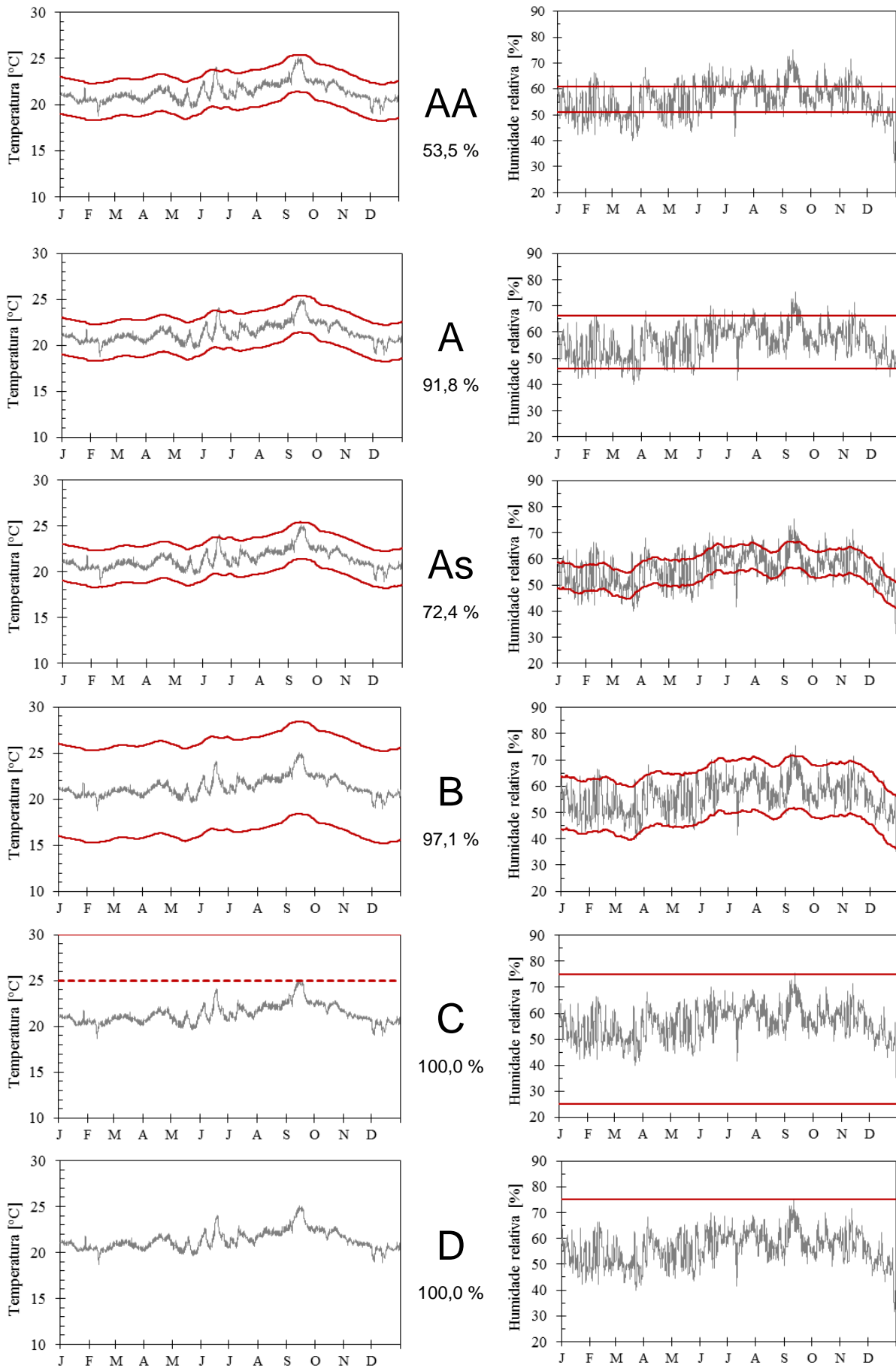


Figura 6.48: Comparação dos dados medidos na sala 13 com as classes AA a D da ASHRAE.

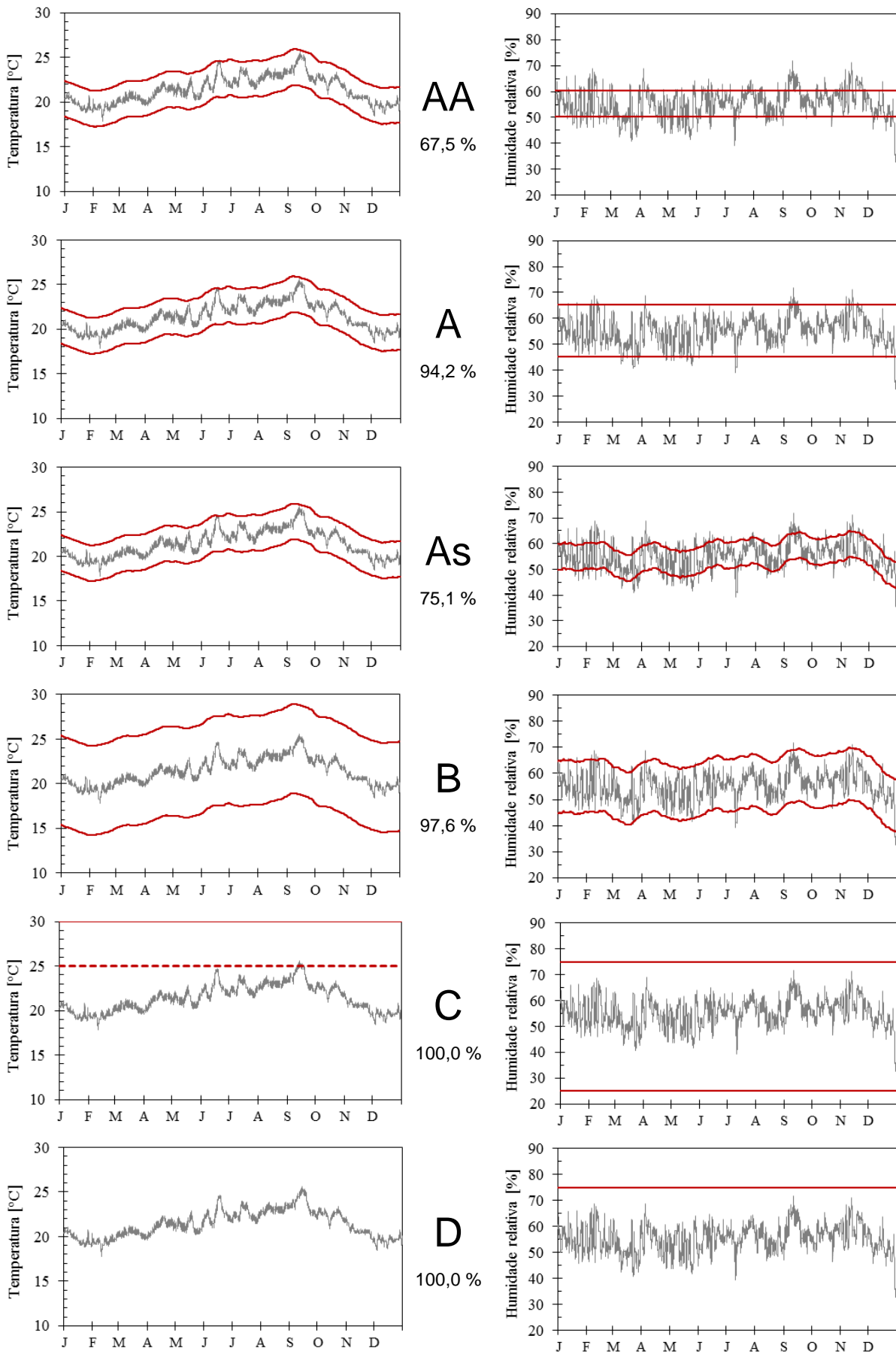


Figura 6.49: Comparação dos dados medidos na sala 12 com as classes AA a D da ASHRAE.

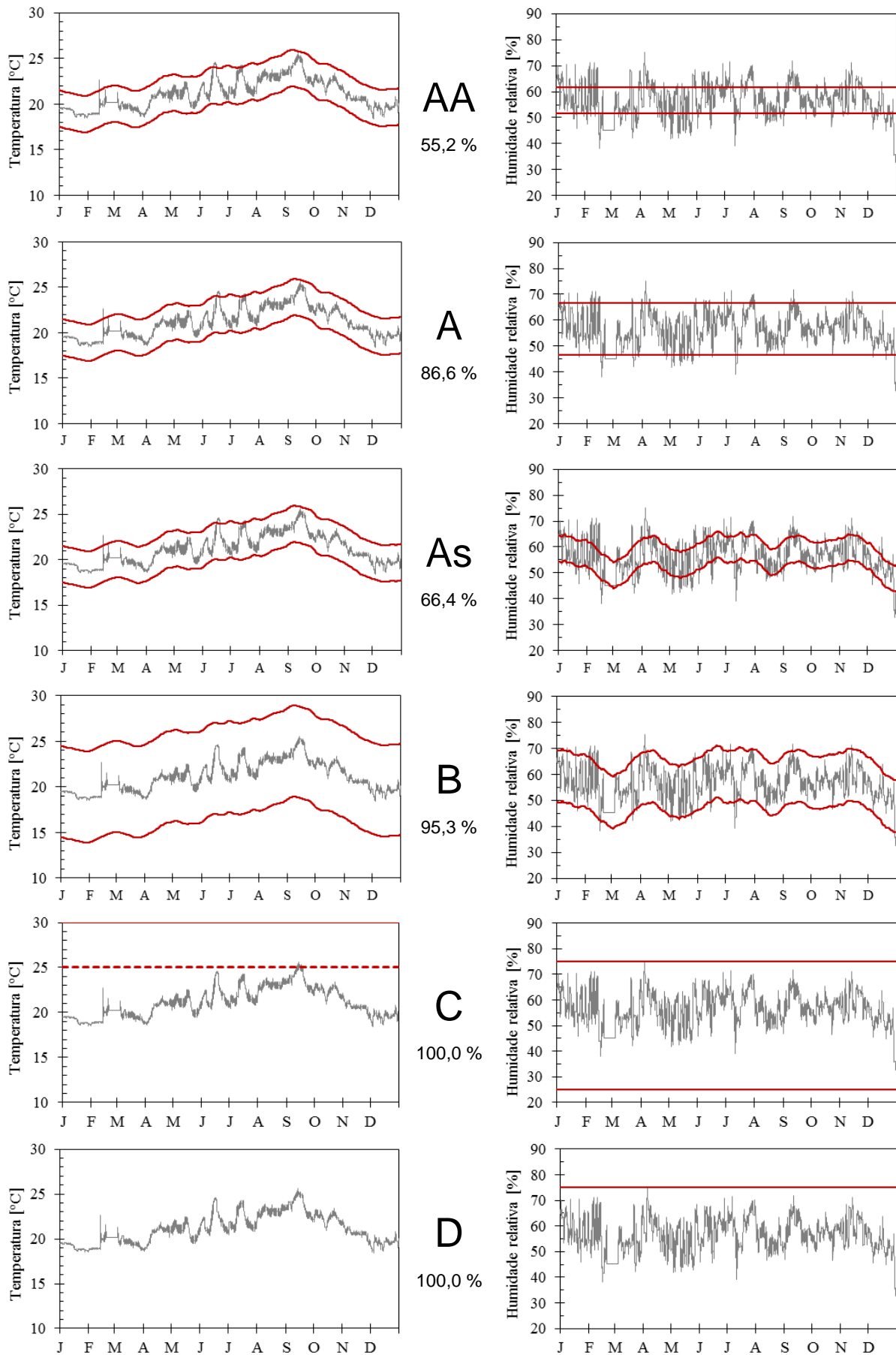


Figura 6.50: Comparação dos dados medidos na sala 11 com as classes AA a D da ASHRAE.

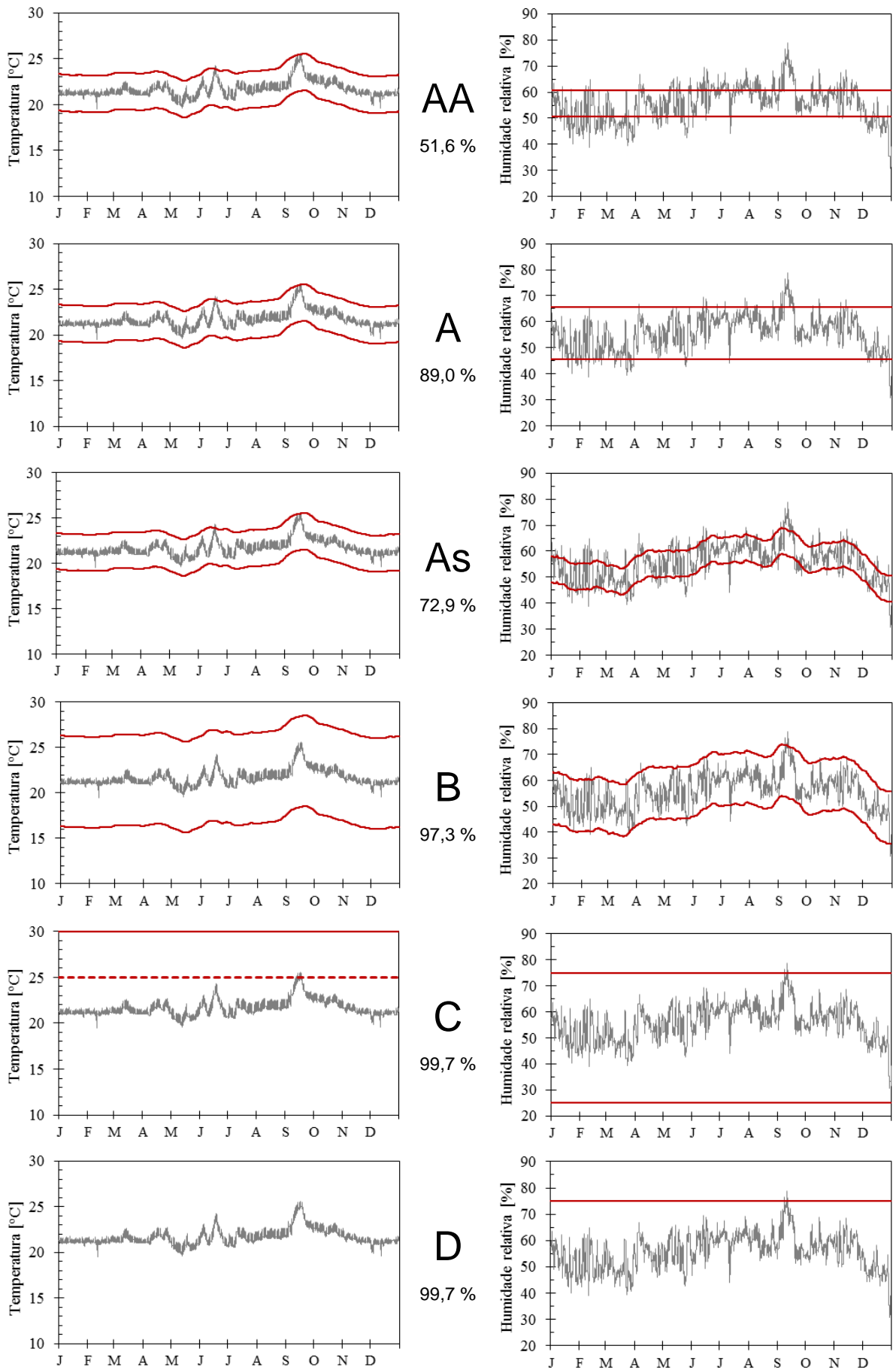


Figura 6.51: Comparação dos dados medidos na sala 16 com as classes AA a D da ASHRAE.

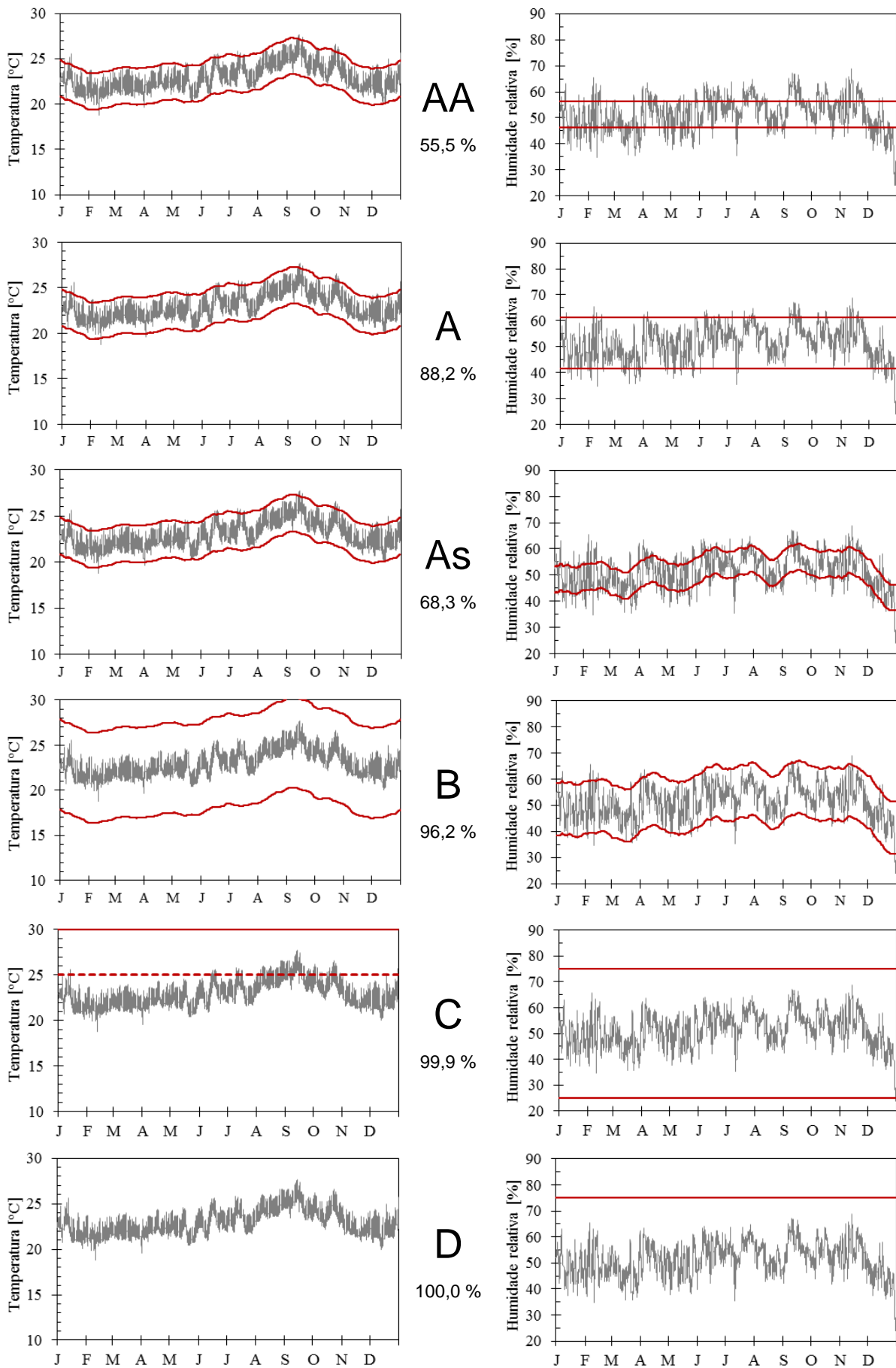


Figura 6.52: Comparação dos dados medidos na sala 25 com as classes AA a D da ASHRAE.

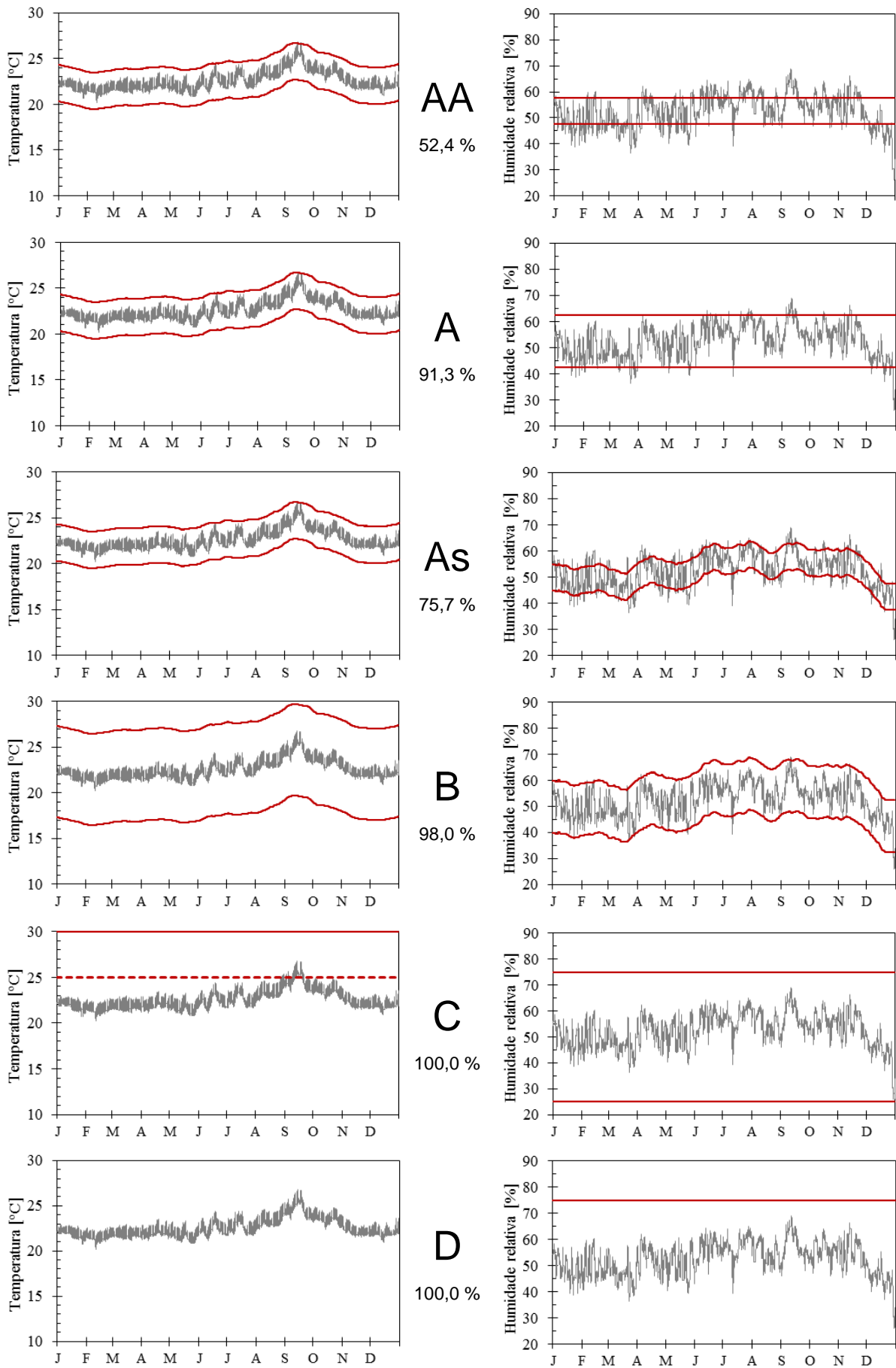


Figura 6.53: Comparação dos dados medidos na sala 41 com as classes AA a D da ASHRAE.

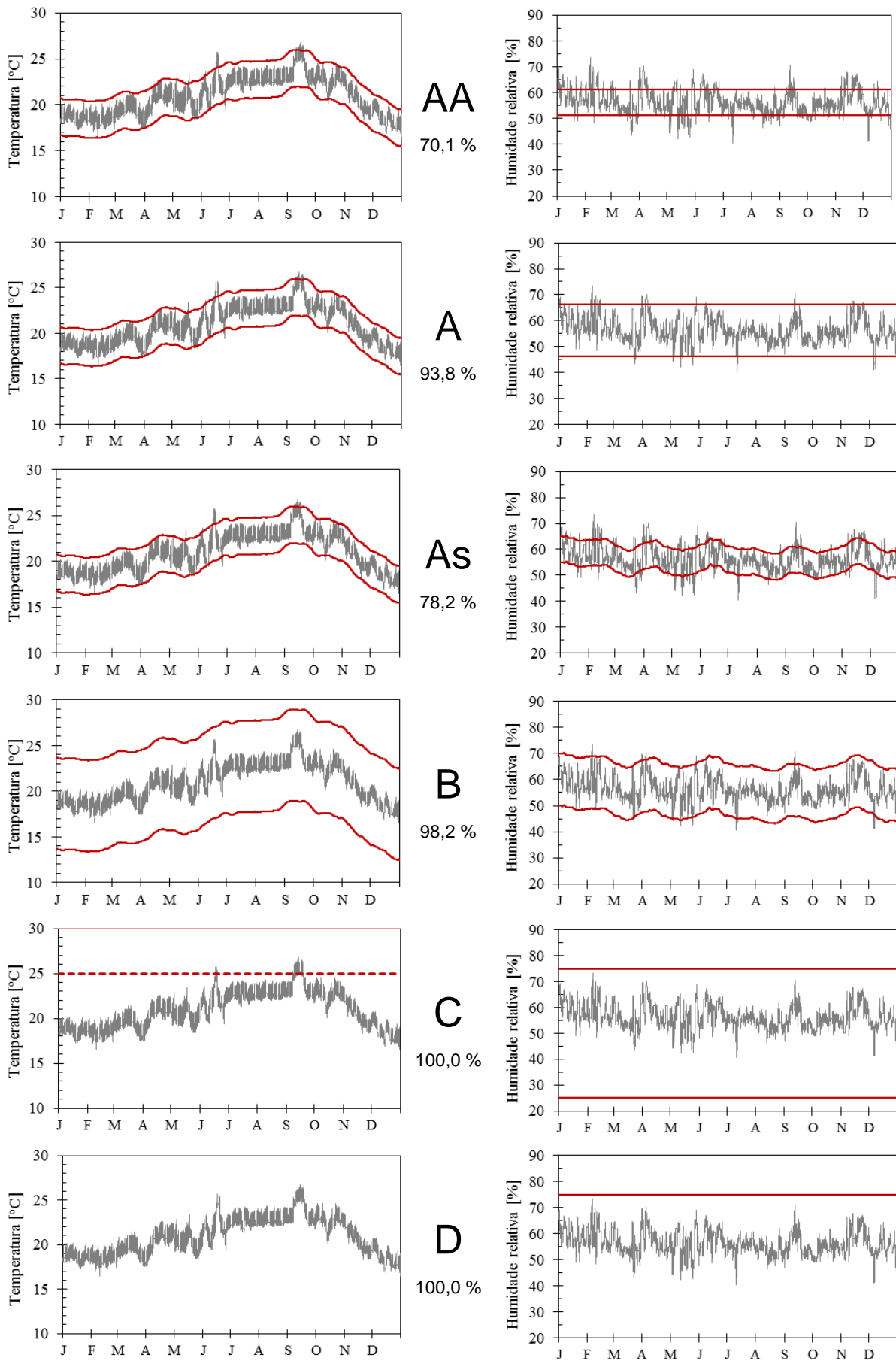


Figura 6.54: Comparação dos dados medidos na sala 61 com as classes AA a D da ASHRAE.

6.6.2. Salas de reserva

As Figuras 6.55 e 6.56 dizem respeito à representação gráfica da especificação ASHRAE para a sala de reserva Casa Forte e reserva de pintura. A sua análise permite verificar a percentagem de tempo em que os limites de temperatura e humidade relativa definidos por cada classe são cumpridos.

A classe AA é cumprida em 98,0 % do tempo para a sala de reserva Casa Forte (Figura 6.55) e em 46,9 % para a sala de reserva de pintura (Figura 6.56). Verificou-se que a temperatura é cumprida na totalidade do tempo nas duas salas e que a humidade relativa é satisfeita entre 46,9 % e 98,0 %, sendo a reserva de pintura a sala que apresenta menor percentagem.

A classe A é cumprida em 99,9 % do tempo para a sala de reserva Casa Forte (Figura 6.55) e em 88,6 % para a sala de reserva de pintura (Figura 6.56). À semelhança da classe anterior, a temperatura é cumprida na totalidade do tempo nas duas salas e a humidade relativa é satisfeita entre 99,9 % e 88,6 %, voltando a ser a reserva de pintura a que apresenta menor percentagem.

A classe As é cumprida em 99,7 % do tempo para a sala de reserva Casa Forte (Figura 6.55) e em 91,6 % para a sala de reserva de pintura (Figura 6.56). À semelhança das classes AA e A, a temperatura é cumprida na totalidade do tempo nas duas salas e a humidade relativa entre 99,7 % e 91,6 % na reserva Casa Forte e de pintura, respectivamente.

A classe B é cumprida em 100,0 % do tempo para a sala de reserva Casa Forte (Figura 6.55) e em 99,5 % para a sala de reserva de pintura (Figura 6.56). A temperatura e a humidade relativa são cumpridas na totalidade do tempo na reserva Casa Forte, no entanto na reserva de pintura apenas a temperatura é cumprida na totalidade do tempo.

As classes C e D são cumpridas em 100,0 % do tempo para ambas as salas.

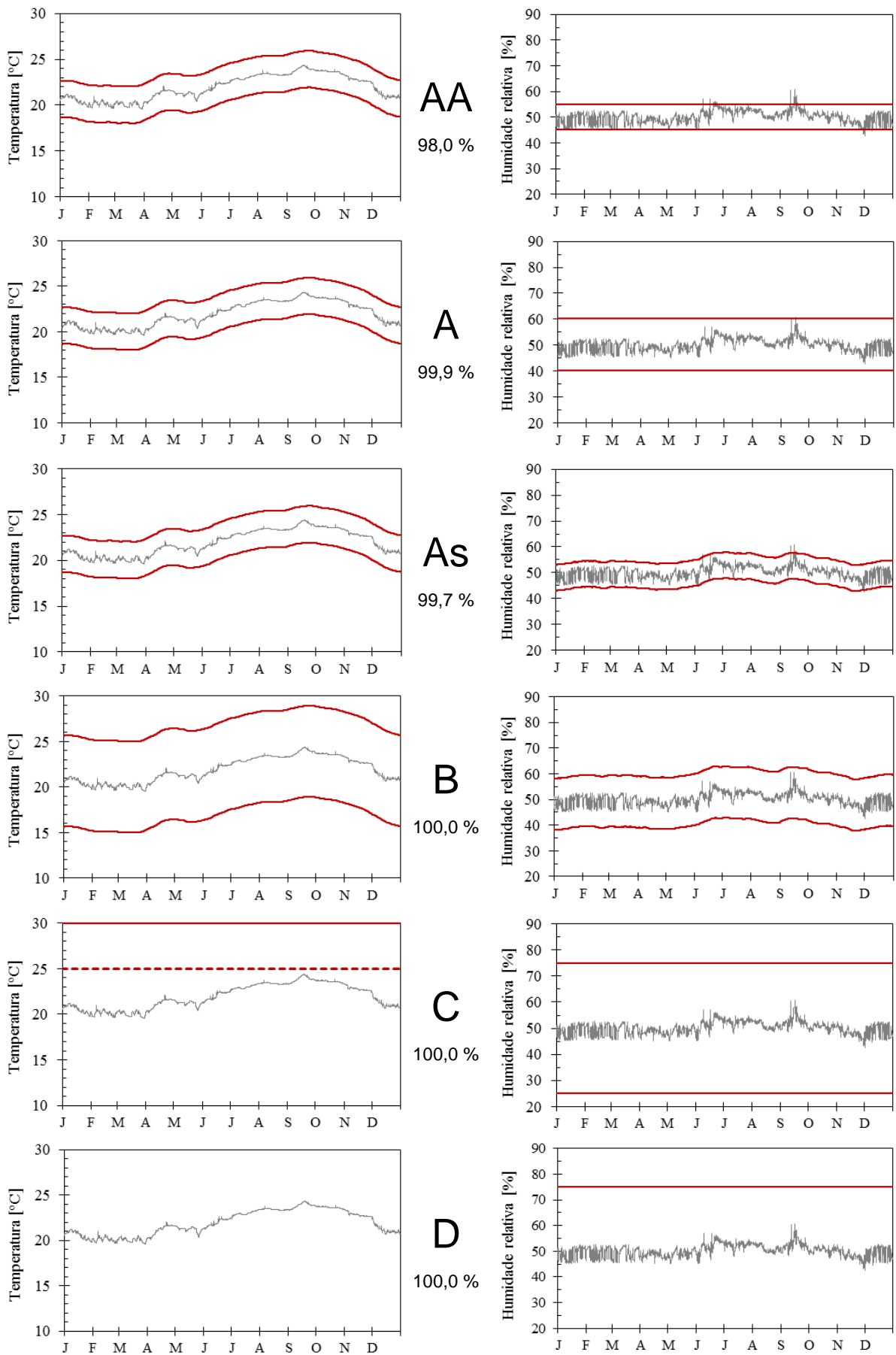


Figura 6.55: Comparação dos dados medidos na sala de reserva Casa Forte com as classes AA a D da ASHRAE.

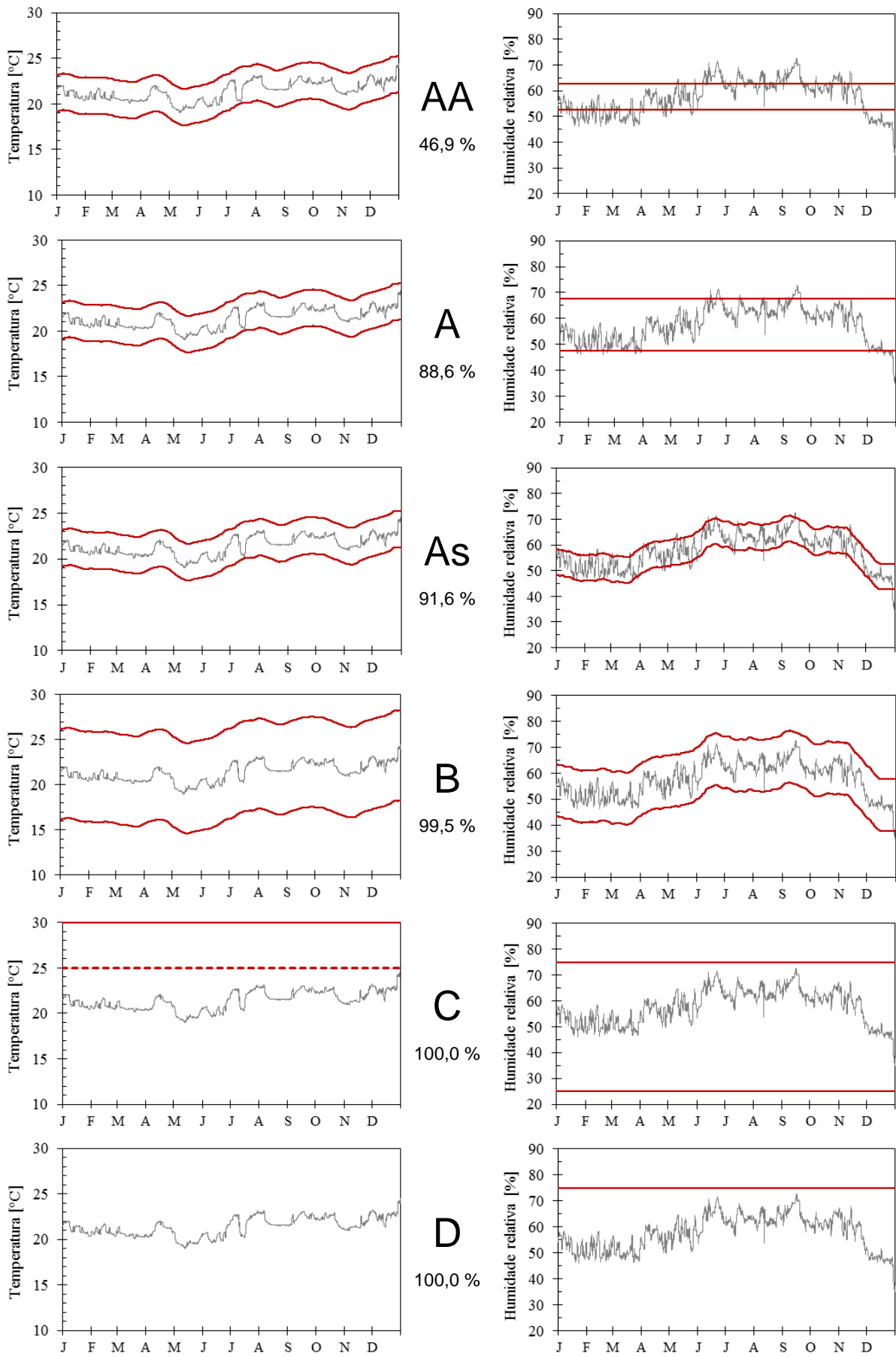


Figura 6.56: Comparação dos dados medidos na sala de reserva de pintura com as classes AA a D da ASHRAE.

6.6.3. Salas não controladas

Nas Figuras 6.57 a 6.58 encontra-se a representação gráfica da especificação ASHARE para a sala de conservação de pintura e para a Capela das Albertas. A sua análise permite verificar a percentagem de tempo em que os limites de temperatura e humidade relativa definidos por cada classe são cumpridos.

A classe AA é cumprida apenas em 28,0 % do tempo para a sala de conservação de pintura (Figura 6.57) e em 80,8 % para a capela das Albertas (Figura 6.58).

Não só para esta classe mas também para as restantes, verificou-se que a temperatura é cumprida na totalidade do tempo nas duas salas. Desta forma, a percentagem de tempo em que os valores de temperatura e humidade relativa cumprem, simultaneamente, os limites impostos por cada classe é igual à percentagem que a humidade relativa cumpre individualmente os requisitos impostos.

A classe A é cumprida em 54,9 % do tempo para a sala de conservação de pintura (Figura 6.57) e em 98,5 % do tempo e para a capela das Albertas (Figura 6.58).

A classe As é cumprida em 47,6 % do tempo para a sala de conservação de pintura (Figura 6.57) e em 85,8 % para a capela das Albertas (Figura 6.58).

A classe B é cumprida em 81,0 % do tempo para a sala de conservação de pintura (Figura 6.57) e em 99,3 % para a capela das Albertas (Figura 6.58).

As classes C e D são cumpridas em 100,0 % do tempo para a capela das Albertas e em 86,8 % para a sala de conservação de pintura.

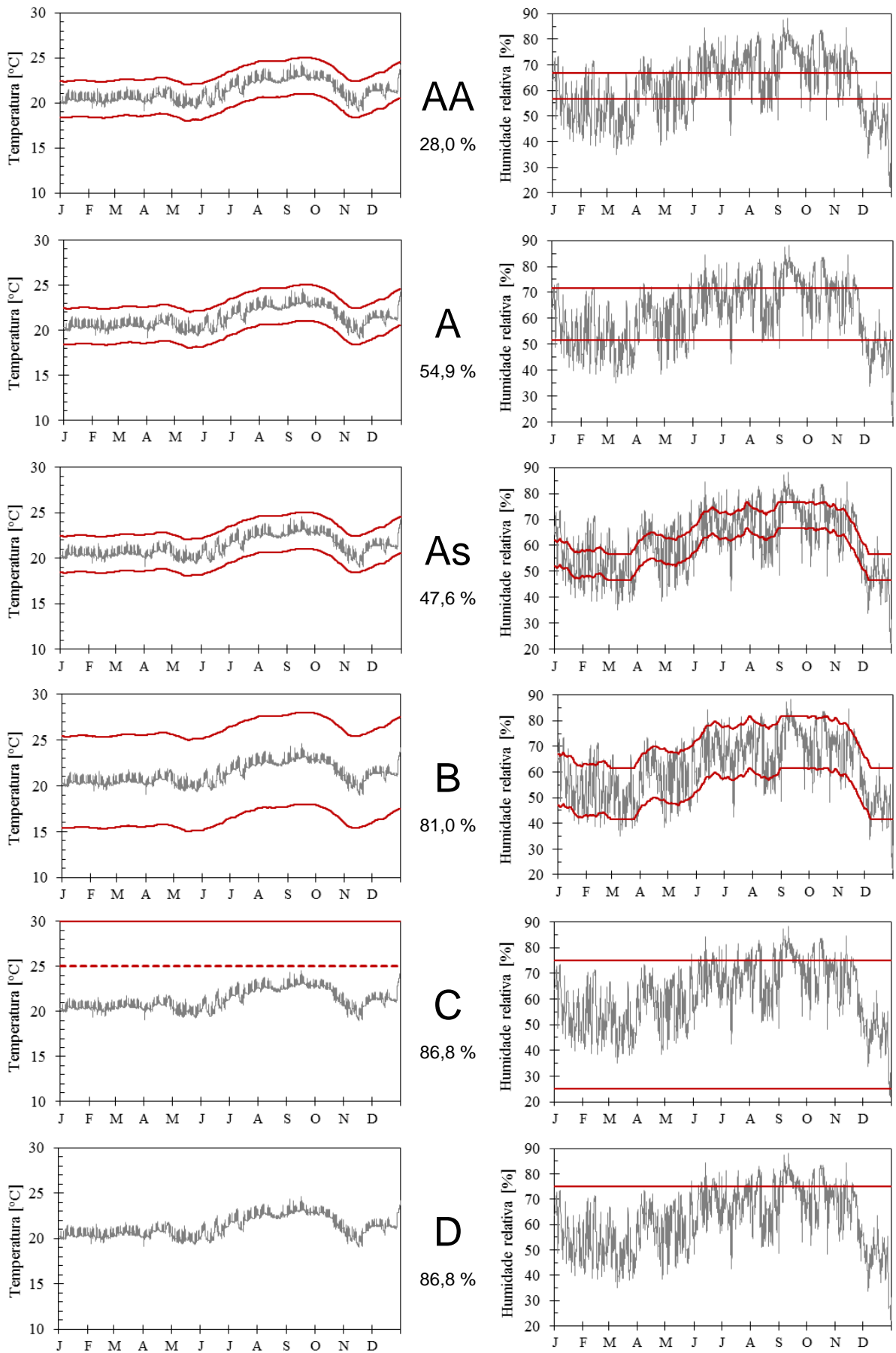


Figura 6.57: Comparação dos dados medidos na sala de conservação de pintura com as classes AA a D da ASHRAE.

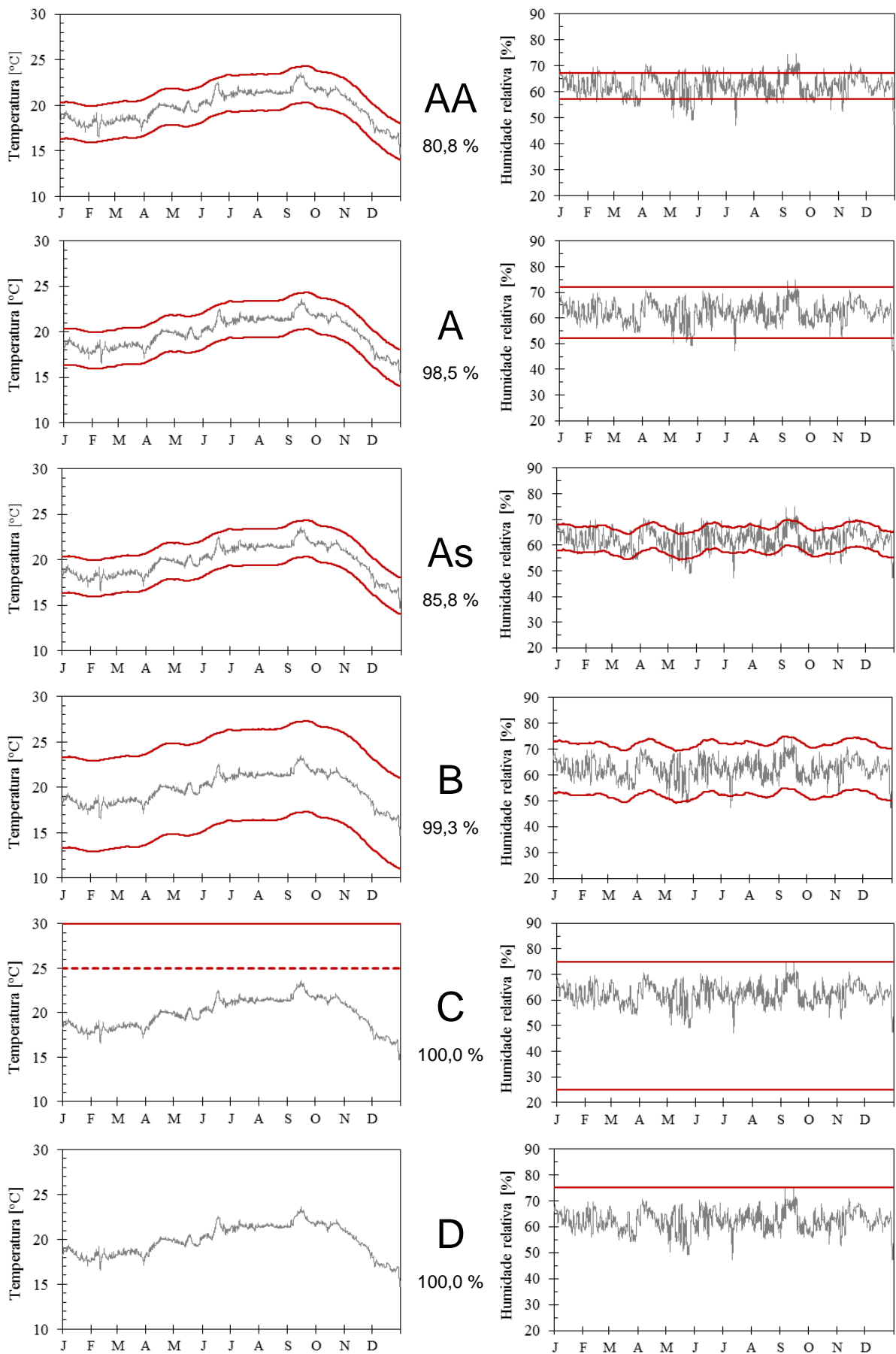


Figura 6.58: Comparação dos dados medidos na Capela das Albertas com as classes AA a D da ASHRAE.

6.6.4. Análise global

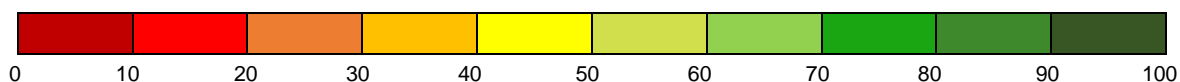
Cada classe tem associados determinados riscos. A classe AA é a mais exigente e é caracterizada por não apresentar riscos de danos mecânicos para a maioria dos artefactos e pinturas. A classe A apresenta um risco reduzido de degradação mecânica para os artefactos de alta vulnerabilidade, no entanto para a maioria dos artefactos e pinturas não há nenhum risco de danos mecânicos associado. A classe B (a mais expectável para este tipo de edifícios) apresenta um risco de degradação mecânica moderado para artefactos bastante vulneráveis, contudo para a maioria dos artefactos e pinturas o risco é reduzido. De uma forma geral, esta classe não acarreta riscos de maior. A classe C pode ser caracterizada pelo alto risco de danos mecânicos nos artefactos altamente vulneráveis e um risco moderado para a generalidade dos artefactos e pinturas. Por fim, a classe D é a menos exigente e pode ser caracterizada pelo elevado risco de deterioração mecânica imediata ou cumulativa para a globalidade dos artefactos e pinturas.

Na Tabela 6.1 apresenta-se uma síntese das percentagens de valores de temperatura e humidade relativa que se encontram simultaneamente dentro das respectivas bandas.

Tabela 6.1: Resumo das percentagens pertencentes a cada classe climática para cada sala.

Salas	Classes climáticas ASHRAE [%]					
	AA	A	As	B	C	D
13	53,5	91,8	72,4	97,1	100,0	100,0
12	67,5	94,2	75,1	97,6	100,0	100,0
11	55,2	86,6	66,4	95,3	100,0	100,0
16	51,6	89,0	72,9	97,3	99,7	99,7
25	55,5	88,2	68,3	96,2	99,9	100,0
41	52,4	91,3	75,7	98,0	100,0	100,0
61	70,1	93,8	78,2	98,2	100,0	100,0
Reserva Casa Forte	98,0	99,9	99,7	100,0	100,0	100,0
Reserva de pintura	46,9	88,6	91,6	99,5	100,0	100,0
Conservação de pintura	28,0	54,9	47,6	81,0	86,8	86,8
Capela das Albertas	80,8	98,5	85,8	99,3	100,0	100,0

Escala:



De uma forma geral não existe um grande risco associado a cada sala, uma vez que todas cumprem numa percentagem bastante elevada a classe expectável para este tipo de edifício – classe B (Tabela 4.6). No entanto, as classes mais exigentes – classe AA e As não são cumpridas em grande percentagem de tempo.

As salas que apresentam um melhor comportamento são as reservas, ou seja, a reserva Casa Forte e reserva de pintura, apesar da última apresentar uma percentagem bastante reduzida para a classe AA. A Capela das Albertas, apesar de não climatizada, apresenta percentagens bastante satisfatórias. A

sala que apresenta o pior comportamento é a conservação de pintura, onde apenas em 28 % do tempo se cumpre a classe AA.

Através da Tabela 6.2 é possível ter uma percepção de todos os resultados obtidos. No geral, o índice de desempenho apresenta valores bastante baixos. Em nenhuma das salas analisadas este valor é superior a 50 %, o que significa que os limites de temperatura e humidade relativa impostos ao Museu não foram cumpridos em metade do tempo do período em estudo. Parece não haver um padrão, uma vez que para algumas salas a temperatura é o parâmetro cumprido em maior percentagem de tempo mas para outras salas é a humidade relativa que assume esta posição.

Algumas das salas que apresentam os melhores comportamentos segundo a especificação ASHRAE apresentam um desempenho fraco no cumprimento dos limites impostos ao Museu. Considere-se o exemplo da reserva Casa Forte, sala que apresenta o melhor comportamento segundo a especificação ASHRAE e apresenta um índice de desempenho de apenas 15,6 %. O mesmo acontece para a Capela das Albertas. Pelo contrário, a sala de conservação de pintura, que apresenta pior comportamento segundo a especificação ASHRAE, apresenta um bom índice de desempenho face às restantes salas.

É interessante comparar o comportamento da Capela das Albertas com as restantes salas. Devido à ausência de sistema de climatização apresenta flutuações sazonais superiores à maioria das salas, contudo, em termos de ciclos diários e flutuações de curta duração apresenta um comportamento melhor. Este facto parece indicar que o sistema de climatização e a influência dos visitantes podem conduzir a maiores flutuações diárias, que, normalmente, têm uma influência negativa para a conservação.

Tabela 6.2: Resultados globais.

Sala	ID [%]			Média anual		Ciclos diários		Amplitude sazonal		Flutuação curta duração		ASHRAE					
	Geral	t	Hr	t [°C]	Hr [%]	t [°C]	Hr [%]	t [°C]	Hr [%]	t [°C]	Hr [%]	AA [%]	A [%]	As [%]	B [%]	C [%]	D [%]
13	36,4	72,4	53,8	21,3	56,1	0,7	11,9	3,2	15,7	4,0	32,6	53,5	91,8	72,4	97,1	100,0	100,0
12	26,3	42,5	68,3	21,4	55,2	0,9	11,0	4,7	12,2	3,7	31,0	67,5	94,2	75,1	97,6	100,0	100,0
11	17,3	40,4	55,4	21,1	56,5	1,0	12,3	5,1	13,4	5,0	36,9	55,2	86,6	66,4	95,3	100,0	100,0
16	36,3	75,8	50,6	21,6	55,7	1,1	10,9	2,9	18,8	4,1	32,2	51,6	89,0	72,9	97,3	99,7	99,7
25	13,4	33,2	50,0	22,9	51,5	2,6	12,3	3,9	17,7	5,9	35,2	55,5	88,2	68,3	96,2	99,9	100,0
41	17,4	40,7	53,5	22,5	52,5	1,6	9,9	3,2	18,8	3,4	28,5	52,4	91,3	75,7	98,0	100,0	100,0
61	17,4	24,3	73,4	20,8	56,3	2,2	10,1	6,5	7,1	6,8	30,1	70,1	93,8	78,2	98,2	100,0	100,0
Reserva Casa Forte	15,6	47,5	55,7	21,9	50,1	0,3	5,4	3,9	5,2	1,7	13,9	98,0	99,9	99,7	100,0	100,0	100,0
Reserva de pintura	27,3	60,0	37,6	21,4	57,7	0,5	5,2	3,6	22,2	3,1	16,6	46,9	88,6	91,6	99,5	100,0	100,0
Conservação de pintura	18,3	62,2	23,9	21,3	61,6	1,3	18,5	3,0	35,1	3,2	43,1	28,0	54,9	47,6	81,0	86,8	86,8
Capela das Albertas	12,1	44,9	27,4	19,9	62,2	0,6	7,9	6,3	5,6	3,1	25,1	80,8	98,5	85,8	99,3	100,0	100,0

Apesar dos reduzidos valores do índice de desempenho, o Museu apresenta, no geral, uma boa classificação no que respeita à qualidade do ambiente para a conservação, o que parece indicar que os limites definidos não são adequados ou são demasiado exigentes, tanto para a conservação como também para o sistema de climatização existente, podendo-se traduzir num gasto desnecessário de energia.

6.7. Metodologia FCT-UNL

Numa fase final, após analisar o comportamento do clima interior do Museu, averiguar se os limites impostos são cumpridos e avaliar os riscos que podem pôr em causa a conservação do acervo, utilizou-se uma metodologia dinâmica de modo a definir uma faixa sustentável de temperatura e humidade relativa com base no clima histórico. Esta metodologia pretende aliviar os limites impostos e reduzir as necessidades energéticas sem aumentar o risco de degradação.

Optou-se por aplicar a classe mais exigente, a classe 1, por ser aplicável a museus, edifícios com exigências especiais onde os materiais exigem um controlo apertado.

Na representação gráfica presente nas Figuras 6.59 a 6.69 é possível visualizar as principais etapas de cálculo da metodologia. O ciclo sazonal sustentável é obtido com base numa média móvel a 30 dias (ciclo sazonal) e limitado pelo afastamento máximo definido pelos 10^o e 90^o percentis da diferença entre a média móvel e a média anual (*a*). As flutuações de curta duração são definidas pela diferença entre os dados registados e o ciclo sustentável (*b*). A faixa que permite obter os limites sustentáveis de temperatura e humidade relativa é obtida pela adição do 5^o e 95^o percentis das flutuações de curta duração ao ciclo sazonal sustentável (*c*).

6.7.1. Salas de exposição

Começou-se por aplicar a metodologia às salas de exposição do piso 3. Nas Figuras 6.59, 6.60 e 6.61 é possível visualizar as principais etapas de cálculo da metodologia para as salas 13, 12 e 11, respectivamente.

Para a sala 13 os valores devem oscilar entre um valor mínimo de 20 °C em todas as estações, excepto no Verão, e um valor máximo de 24 °C no Verão e no Outono. Os materiais poderão suportar valores de humidade relativa entre 43 % e 69 %. Para a sala 12, os valores sustentáveis de temperatura situam-se entre 19 e 24 °C. A humidade relativa poderá variar de 45 e 66 %. Os limites mínimo e máximo sustentáveis de temperatura para a sala 11 são, respectivamente, 18 e 25 °C. A humidade relativa poderá variar de 43 a 68 %.

Nas Figuras 6.62 e 6.63 está presente a representação gráfica das etapas de cálculo mais importantes da metodologia das zonas de exposição do piso 2 (sala 16 e 25). A temperatura da sala 16 poderá oscilar entre 20 a 24 °C, a humidade relativa poderá variar entre 42 e 69 %. Os materiais da sala 25 suportaram temperaturas entre 21 e 26 °C e valores de humidade relativa a variar de 39 a 64 %.

As fases fundamentais de cálculo para as salas de exposição do piso 1 (sala 41 e 61), estão presentes nas Figuras 6.64 e 6.65. Os limites sustentáveis de temperatura a impor à sala 41 são de 21 °C e 25 °C. A humidade relativa poderá variar de 40 a 64 %. Para a sala 61, os valores de temperatura podem oscilar entre 17 e 25 °C, os valores de humidade relativa a impor são os mesmos para todo o ano e devem variar entre 48 e 66 %.

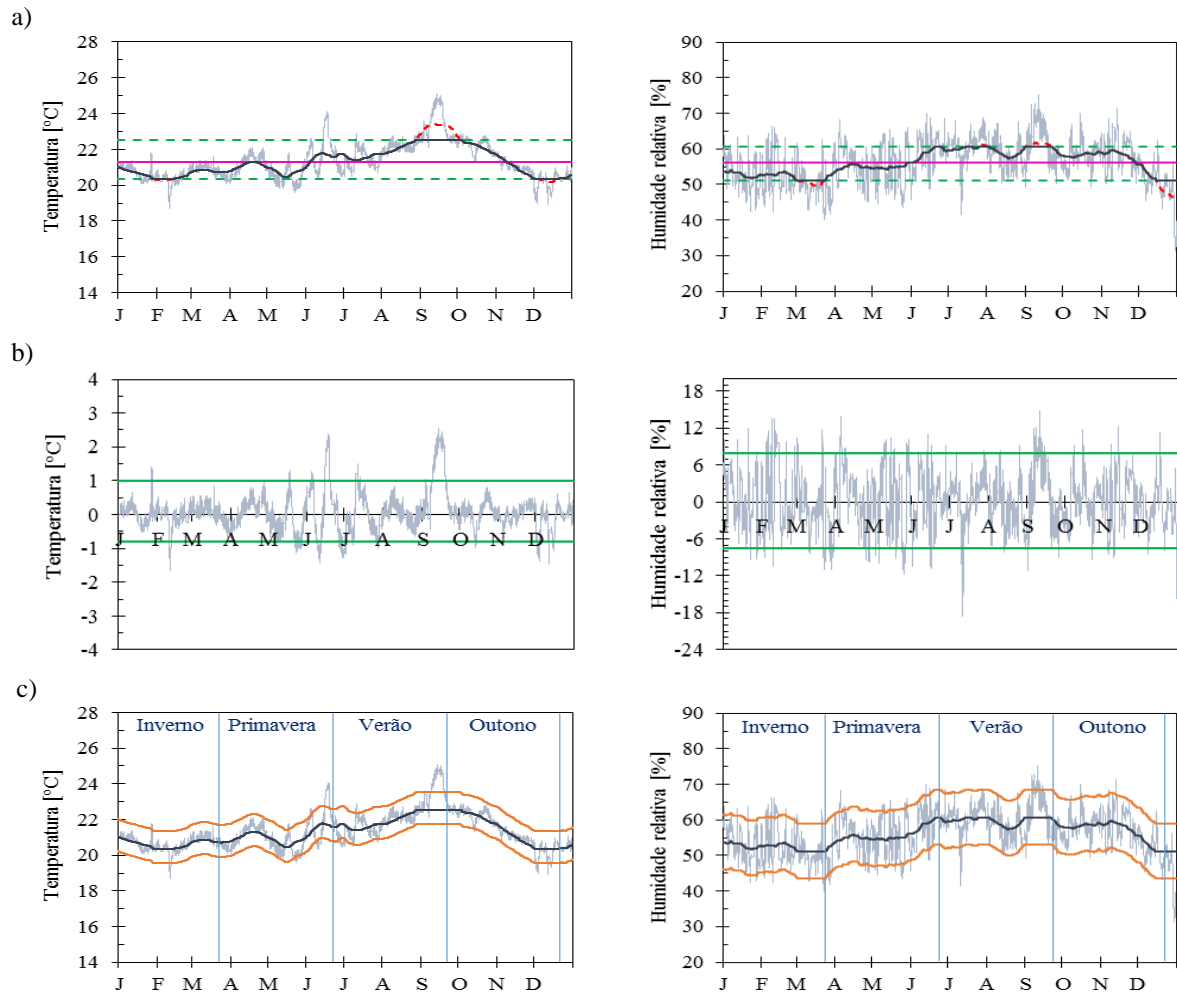


Figura 6.59: Aplicação da metodologia FCT-UNL nos dados recolhidos na sala 13: a) Ciclos sazonais; b) Flutuações de curta duração; c) Limites sustentáveis.

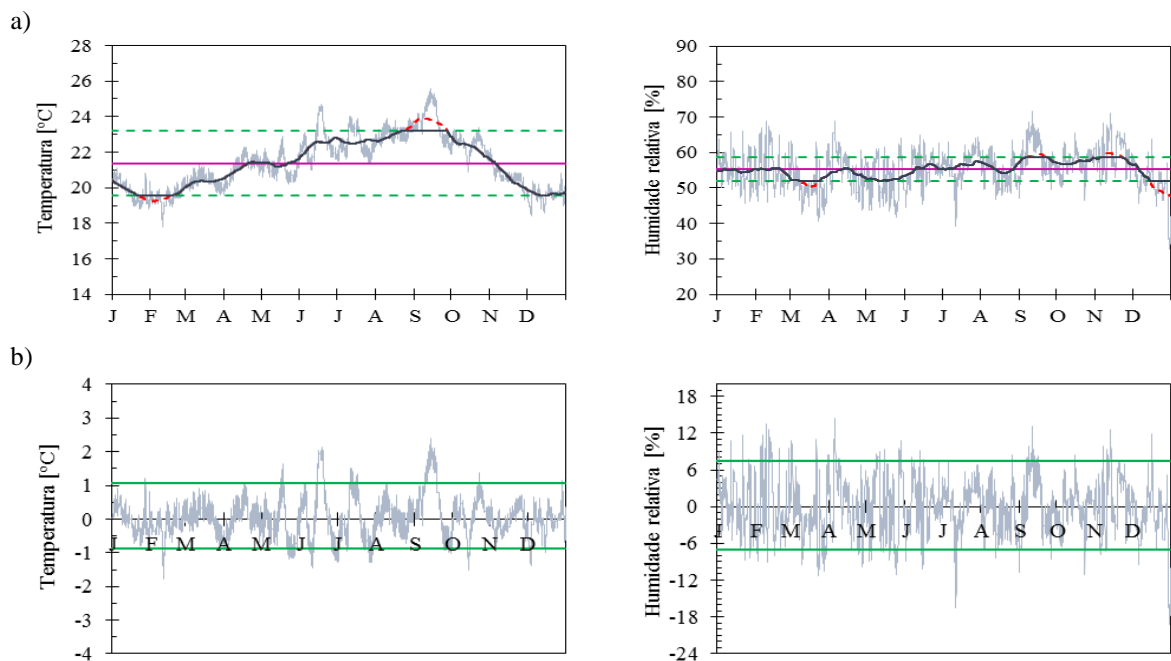


Figura 6.60: Aplicação da metodologia FCT-UNL nos dados recolhidos na sala 12: a) Ciclos sazonais; b) Flutuações de curta duração; c) Limites sustentáveis.

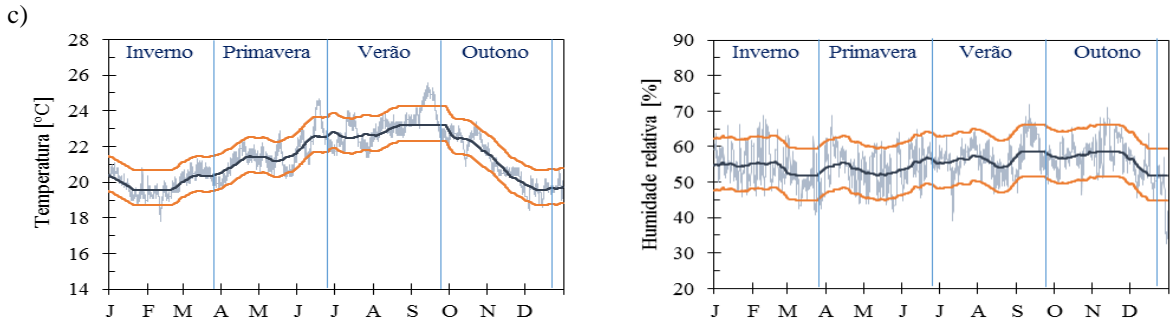


Figura 6.60: Aplicação da metodologia FCT-UNL nos dados recolhidos na sala 12: a) Ciclos sazonais; b) Flutuações de curta duração; c) Limites sustentáveis (continuação).

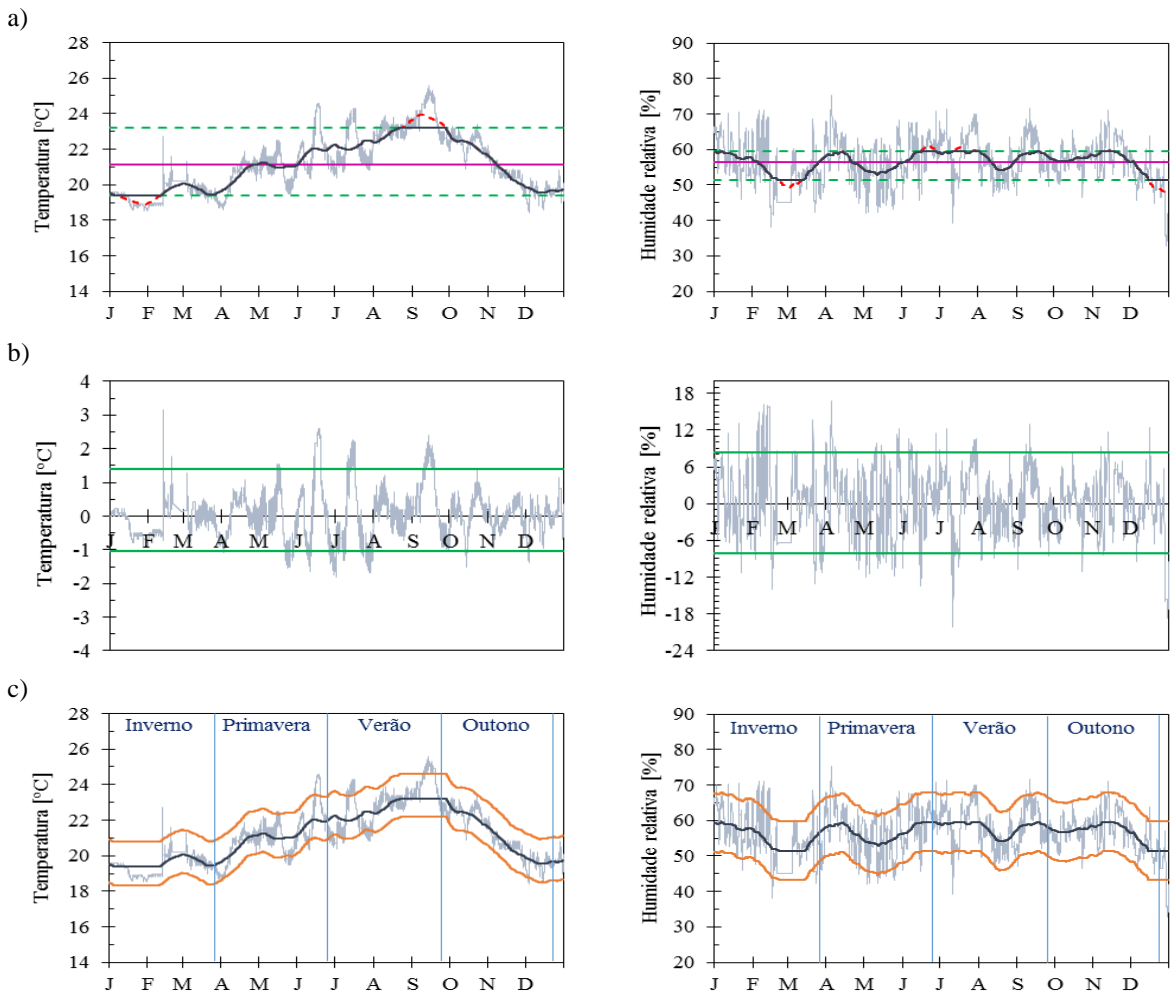


Figura 6.61: Aplicação da metodologia FCT-UNL nos dados recolhidos na sala 11: a) Ciclos sazonais; b) Flutuações de curta duração; c) Limites sustentáveis.

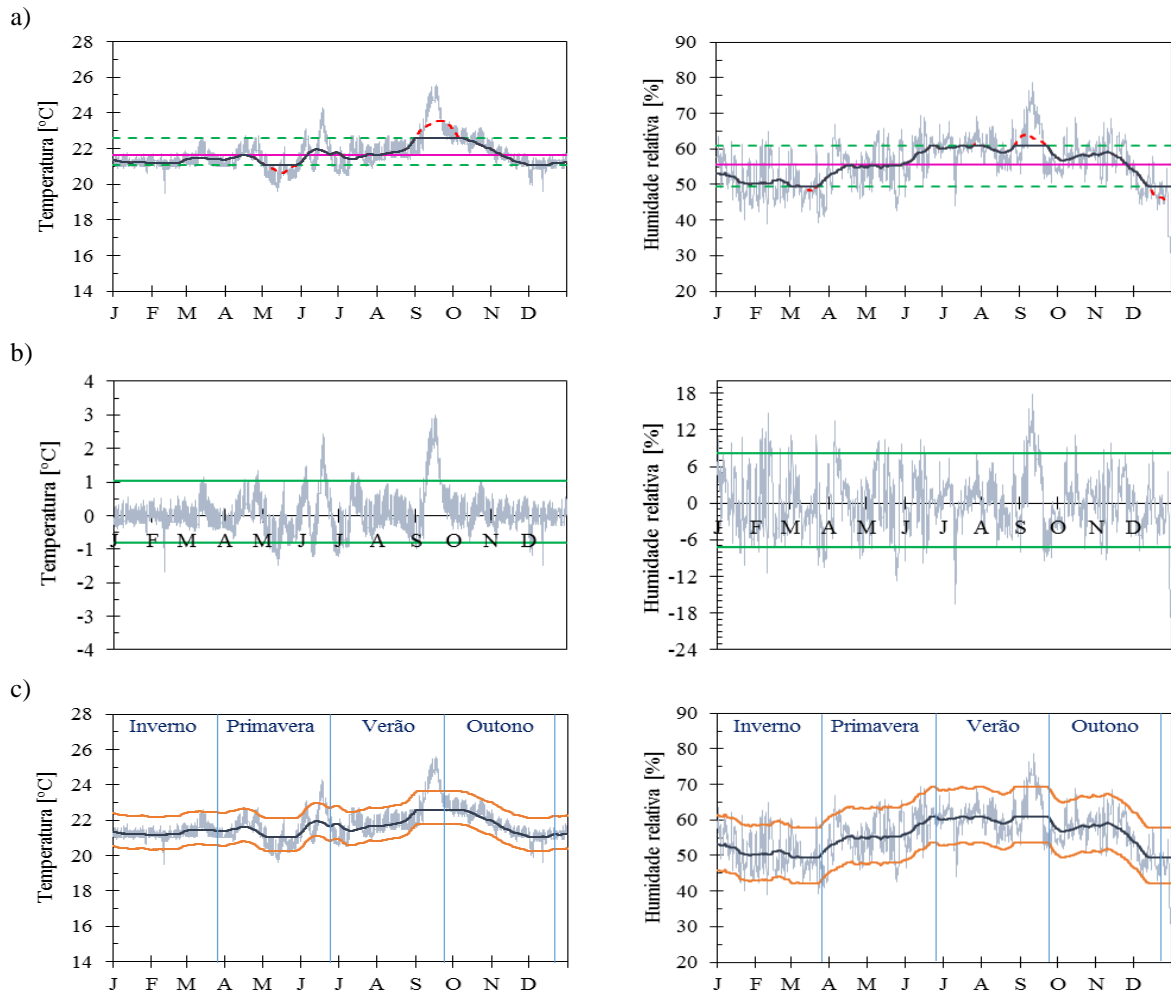


Figura 6.62: Aplicação da metodologia FCT-UNL nos dados recolhidos na sala 16: a) Ciclos sazonais; b) Flutuações de curta duração; c) Limites sustentáveis.

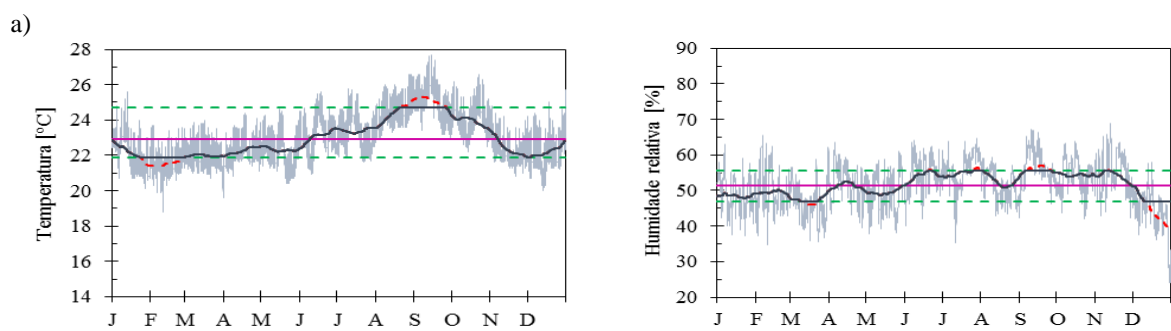


Figura 6.63: Aplicação da metodologia FCT-UNL nos dados recolhidos na sala 25: a) Ciclos sazonais; b) Flutuações de curta duração; c) Limites sustentáveis.

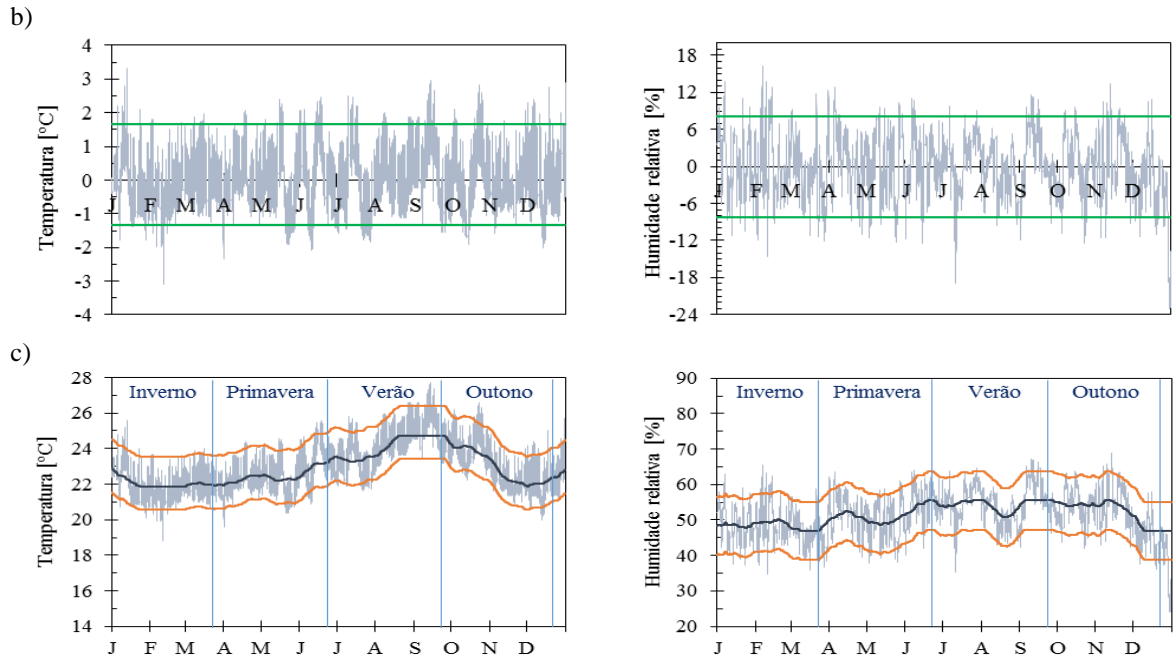


Figura 6.63: Aplicação da metodologia FCT-UNL nos dados recolhidos na sala 25: a) Ciclos sazonais; b) Flutuações de curta duração; c) Limites sustentáveis (continuação).

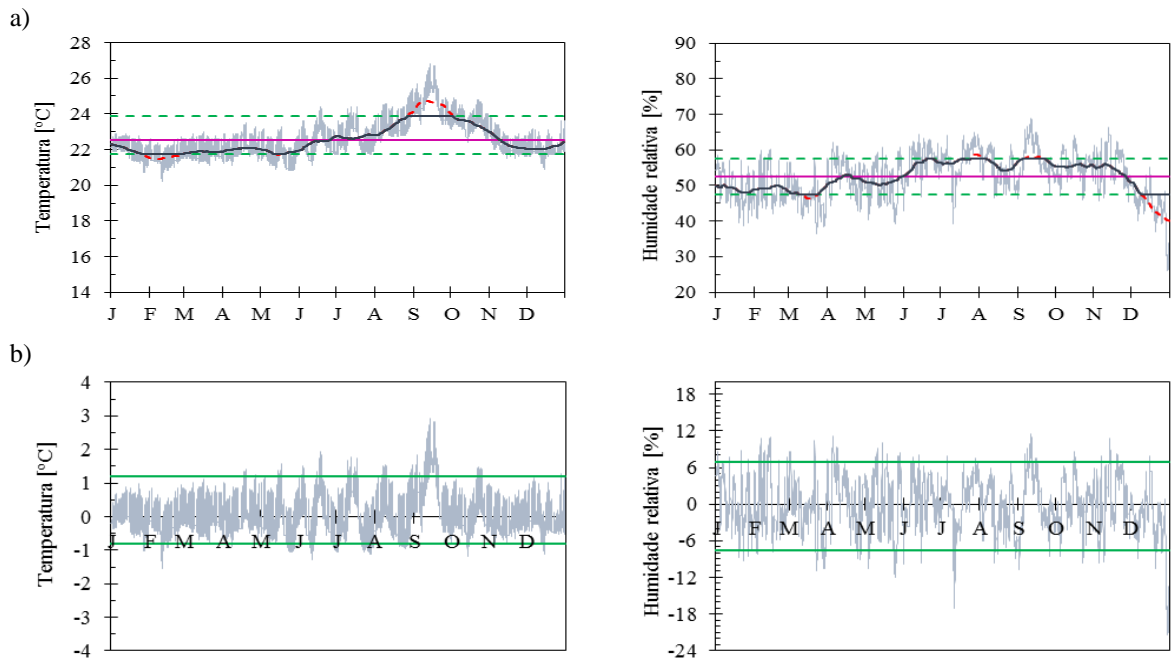


Figura 6.64: Aplicação da metodologia FCT-UNL nos dados recolhidos na sala 41: a) Ciclos sazonais; b) Flutuações de curta duração; c) Limites sustentáveis.

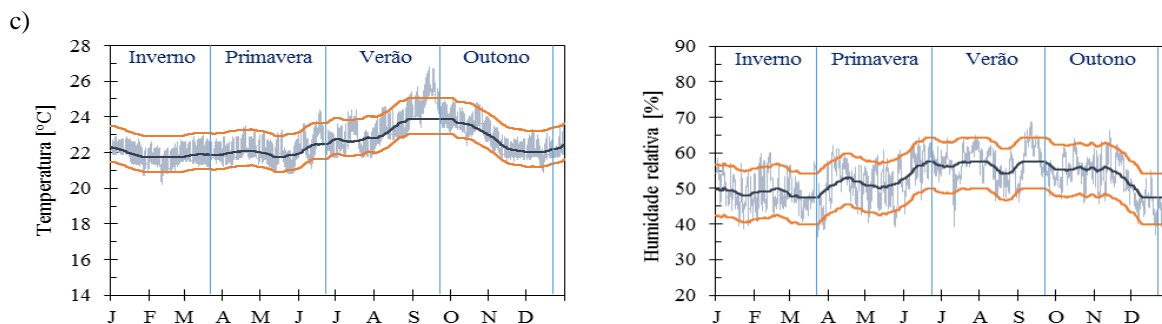


Figura 6.64: Aplicação da metodologia FCT-UNL nos dados recolhidos na sala 41: a) Ciclos sazonais; b) Flutuações de curta duração; c) Limites sustentáveis (continuação).

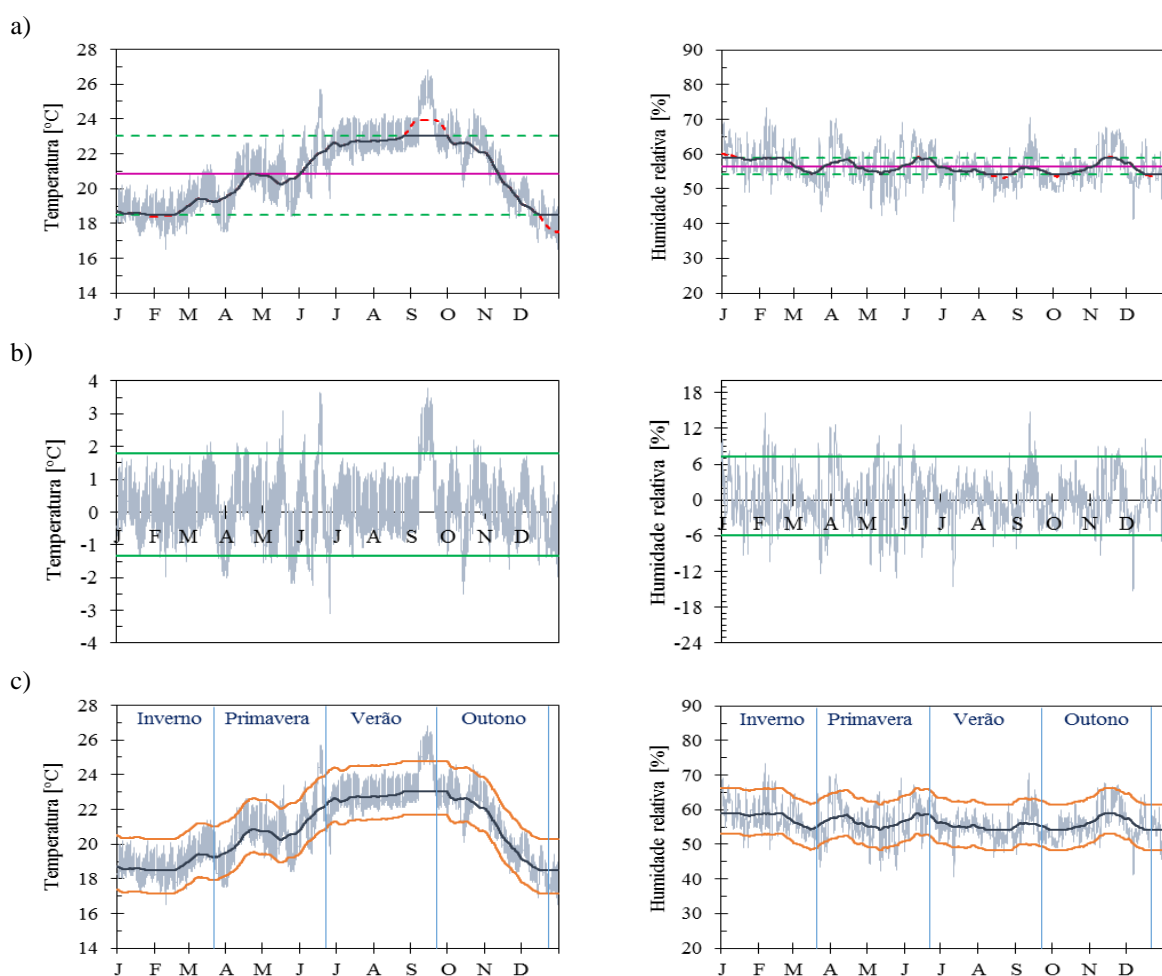


Figura 6.65: Aplicação da metodologia FCT-UNL nos dados recolhidos na sala 61: a) Ciclos sazonais; b) Flutuações de curta duração; c) Limites sustentáveis.

6.7.2. Salas de reserva

As Figuras 6.66 e 6.67 dizem respeito à representação gráfica da metodologia para as salas de reserva em análise, localizadas no piso -1. A faixa de temperatura a impor à sala de reserva Casa Forte é de 20 a 24 °C, a humidade relativa deverá variar entre 46 e 55 %. A sala de reserva de pintura suportará temperaturas a oscilar entre os 19 e 23 °C e valores de humidade relativa a variar entre os 46 e 70 %.

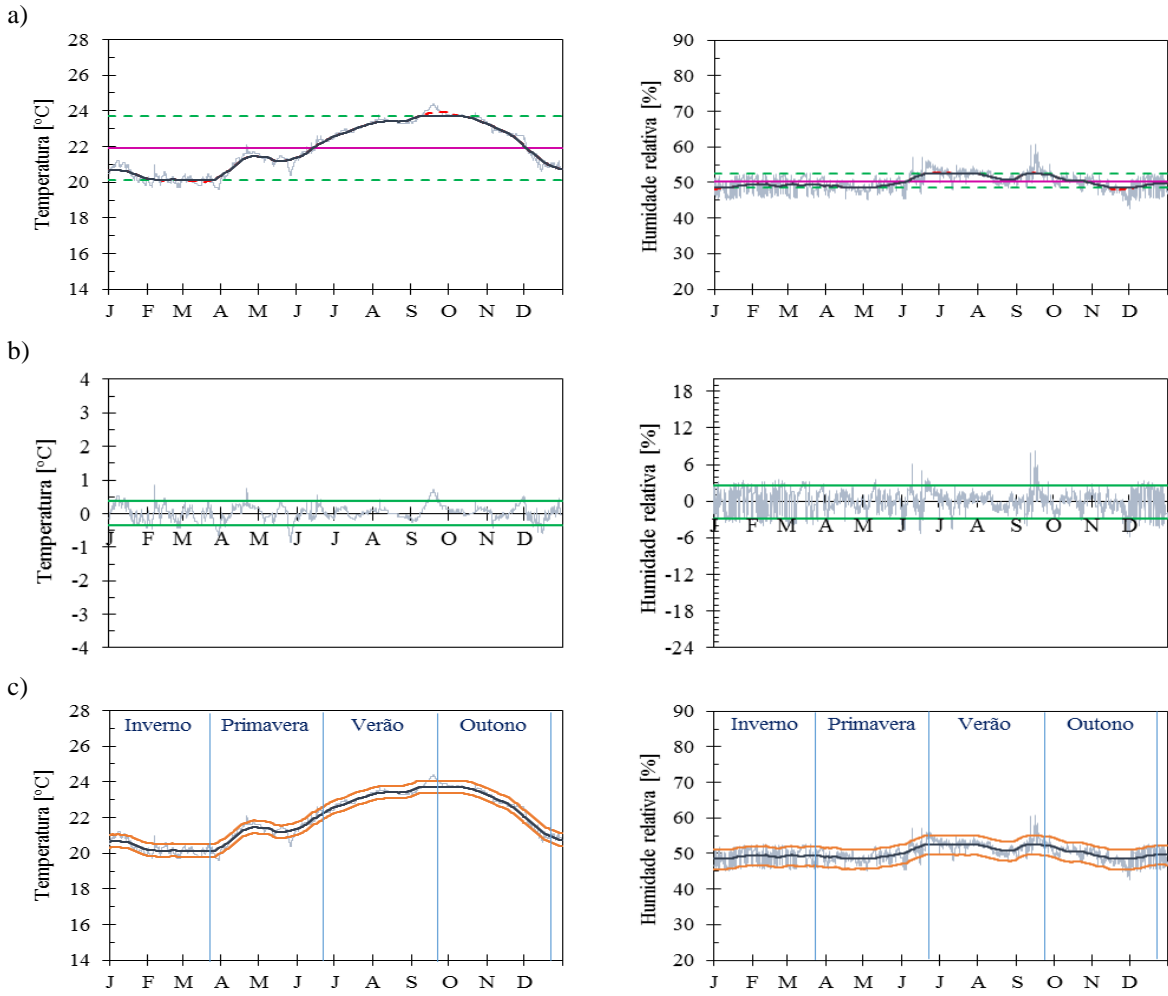


Figura 6.66: Aplicação da metodologia FCT-UNL nos dados recolhidos na sala reserva Casa Forte: a) Ciclos sazonais; b) Flutuações de curta duração; c) Limites sustentáveis.

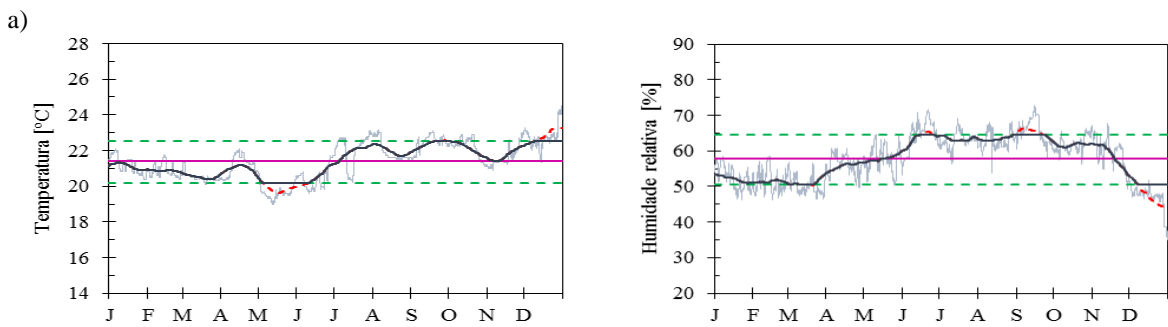


Figura 6.67: Aplicação da metodologia FCT-UNL nos dados recolhidos na sala de reserva de pintura: a) Ciclos sazonais; b) Flutuações de curta duração; c) Limites sustentáveis.

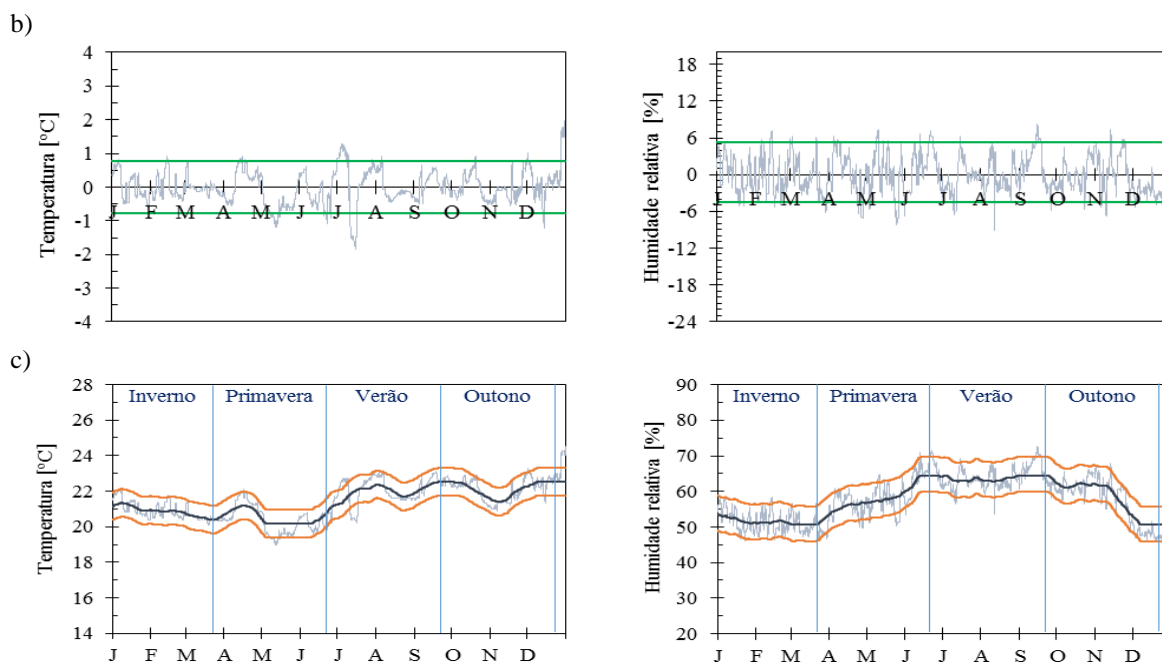


Figura 6.67: Aplicação da metodologia FCT-UNL nos dados recolhidos na sala de reserva de pintura: a) Ciclos sazonais; b) Flutuações de curta duração; c) Limites sustentáveis (continuação).

6.7.3. Salas não controladas

Nas Figuras 6.68 e 6.69 é possível visualizar as principais etapas de cálculo da metodologia para as salas não controladas em estudo, sala de conservação de pintura e Capela das Albertas. Para a sala de conservação de pintura a temperatura deve oscilar entre 20 e 24 °C e a humidade deve ser mantida 47 e 75 % de modo a evitar a ocorrência de danos biológicos. A temperatura da Capela das Albertas deve estar compreendida entre 17 e 23 °C e a humidade relativa deve oscilar entre os 55 e 70 %.

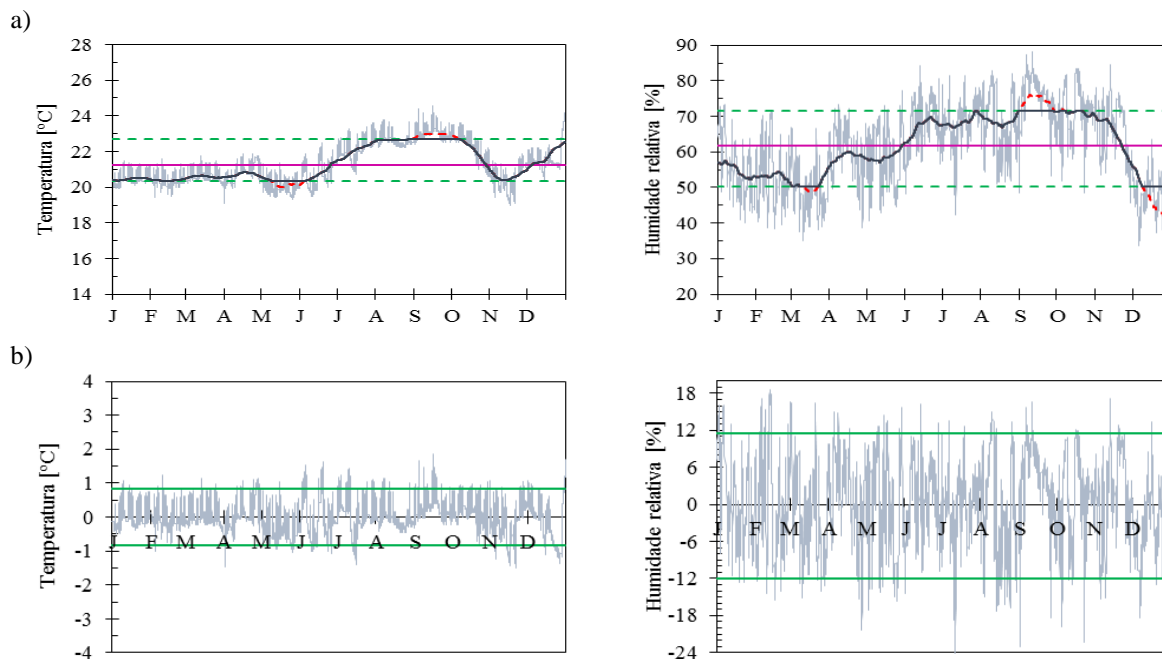


Figura 6.68: Aplicação da metodologia FCT-UNL nos dados recolhidos na sala conservação de pintura: a) Ciclos sazonais; b) Flutuações de curta duração; c) Limites sustentáveis.

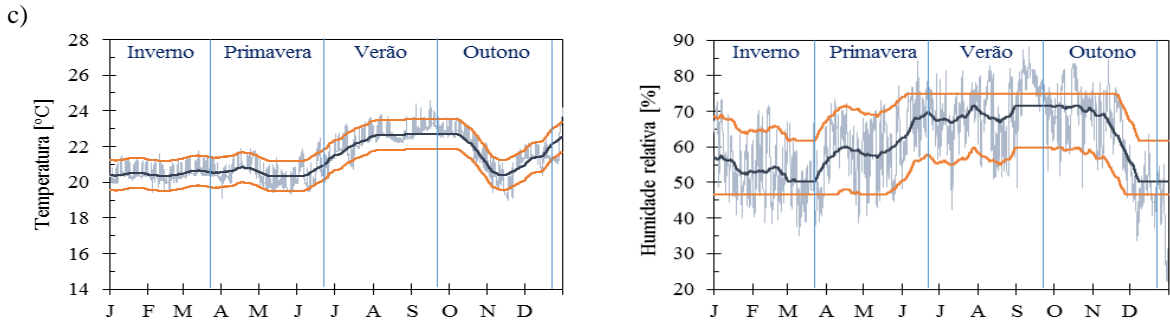


Figura 6.68: Aplicação da metodologia FCT-UNL nos dados recolhidos na sala conservação de pintura: a) Ciclos sazonais; b) Flutuações de curta duração; c) Limites sustentáveis (continuação).

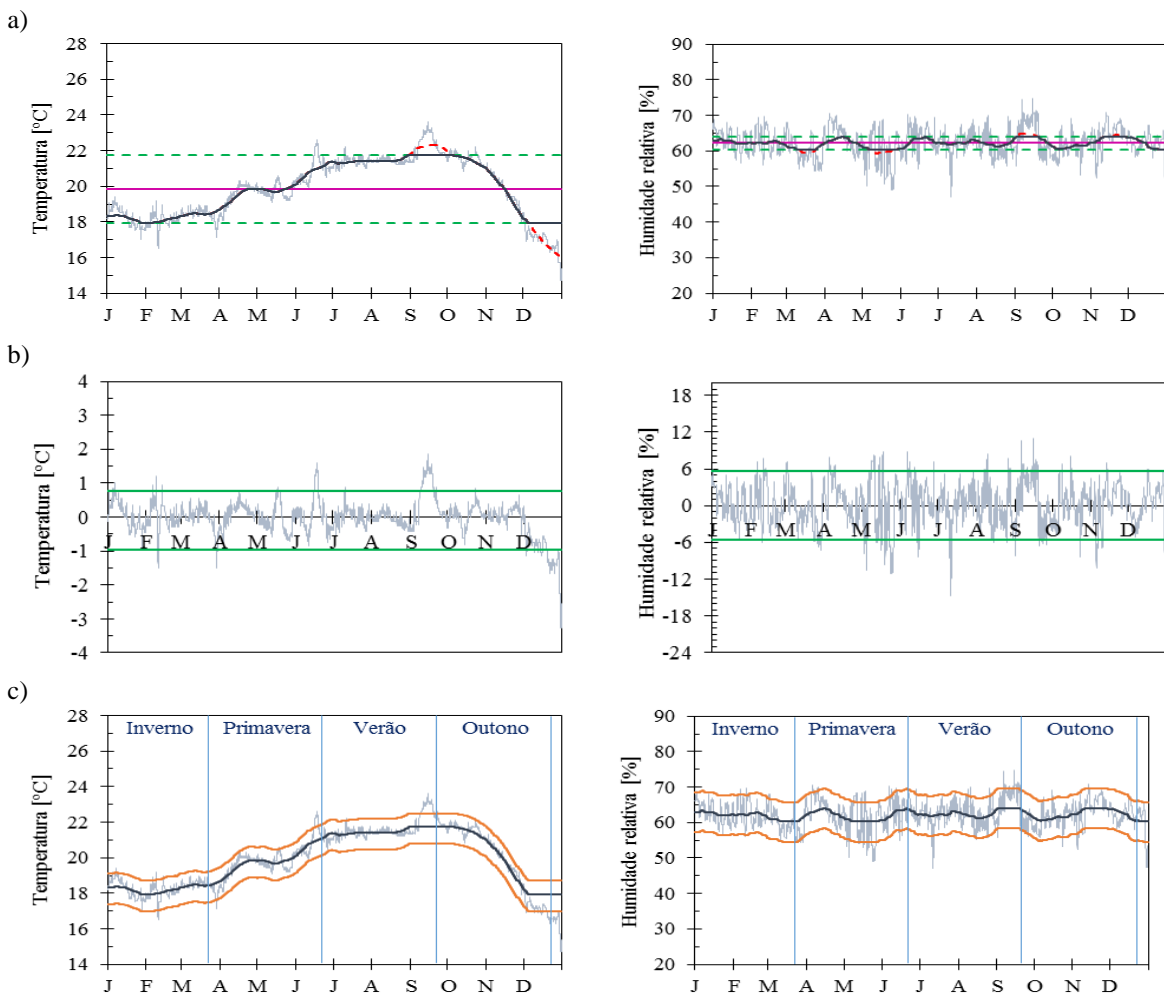


Figura 6.69: Aplicação da metodologia FCT-UNL nos dados recolhidos na Capela das Albertas: a) Ciclos sazonais; b) Flutuações de curta duração; c) Limites sustentáveis.

6.7.4. Análise global

Definidos os limites sustentáveis de temperatura e humidade relativa, procedeu-se à aplicação da especificação ASHRAE, de modo a verificar de que forma evoluíram os riscos de degradação. Na Tabela 6.3 é possível analisar a amplitude sazonal, as flutuações de curta duração e a percentagem em que cada classe é cumprida para cada sala.

Tabela 6.3: Valores da amplitude sazonal, flutuações de curta duração e percentagens em que cada classe climática ASHRAE é cumprida para cada sala.

Sala	Amplitude sazonal		Flutuação curta duração		ASHRAE					
	t [°C]	Hr [%]	t [°C]	Hr [%]	AA [%]	A [%]	As [%]	B [%]	C [%]	D [%]
13	-0,9/+1,2	-5,1/+4,5	-0,8/+1,0	-7,5/+7,9	56,1	93,3	73,7	100,0	100,0	100,0
12	-1,8/+1,8	-3,2/+3,4	-0,9/+1,1	-7,1/+7,5	68,6	96,4	76,2	100,0	100,0	100,0
11	-1,7/+2,1	-5,1/+3,0	-1,0/+1,4	-8,2/+8,3	56,3	90,6	67,5	100,0	100,0	100,0
16	-0,6/+1,0	-6,2/+5,3	-0,8/+1,0	-7,3/+8,3	52,3	89,8	74,1	100,0	100,0	100,0
25	-1,0/+1,8	-4,4/+4,1	-1,3/+1,7	-8,2/+8,1	56,7	91,2	70,1	100,0	100,0	100,0
41	-0,8/+1,3	-5,1/+5,0	-0,8/+1,2	-7,5/+6,9	54,5	92,5	76,7	100,0	100,0	100,0
61	-2,4/+2,2	-2,2/+2,5	-1,3/+1,8	-5,9/+7,2	73,3	100,0	80,3	100,0	100,0	100,0
Reserva Casa Forte	-1,8/+1,8	-1,6/+2,4	0,3/+0,4	-2,9/+2,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Reserva de pintura	-1,2/+1,1	-7,2/+6,7	-0,8/+0,8	-4,6/+5,3	48,3	88,9	96,1	100,0	100,0	100,0
Conservação de pintura	-0,9/+1,5	-11,5/+10,0	-0,8/+0,8	-11,9/+11,5	29,4	55,7	57,7	90,2	100,0	86,8
Capela das Albertas	-1,9/+1,9	-2,0/+1,8	-1,0/+0,8	-5,6/+5,6	82,3	100,0	86,4	100,0	100,0	100,0

Através da análise da Tabela 6.4 verifica-se que a faixa de valores sustentáveis de temperatura e humidade relativa definidos pela metodologia FCT-UNL reduzem o risco de degradação em relação aos valores registados.

Todas as classes da especificação ASHRAE para todas as salas são cumpridas em percentagem igual ou superior para os valores sugeridos pela metodologia FCT-UNL. Com exceção da sala de conservação de pintura todas as salas cumprem a classe B durante todo o ano.

A metodologia FCT-UNL aborda também os ciclos diários, definindo que estes devem ser limitados pelo valor menos exigente obtido pelo 90º percentil dos ciclos diários registados ou pelos valores presentes na norma italiana UNI 10829 (Tabela 6.5).

De acordo com estes resultados e com os conceitos de aclimatização e *proofed fluctuations* é possível afirmar que o cumprimento dos limites definidos pela metodologia FCT-UNL permite garantir a segurança das coleções e diminuir a pressão imposta ao sistema de climatização e ao próprio edifício.

Tabela 6.4: Percentagens pertencentes a cada classe climática em cada sala para os valores reais (registos de 2014) e para os valores a impor sugeridos pela metodologia FCT-UNL. Apresentam-se, respectivamente, a cor verde e vermelha as maiores e menores percentagens em a classe é cumprida em cada sala.

Sala	AA [%]		A [%]		As [%]		B [%]		C [%]		D [%]	
	Real	FCT-UNL	Real	FCT-UNL	Real	FCT-UNL	Real	FCT-UNL	Real	FCT-UNL	Real	FCT-UNL
13	53,5	56,1	91,8	93,3	72,4	73,7	97,1	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
12	67,5	68,6	94,2	96,4	75,1	76,2	97,6	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
11	55,2	56,3	86,6	90,6	66,4	67,5	95,3	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
16	51,6	52,3	89,0	89,8	72,9	74,1	97,3	100,0	99,7	100,0	99,7	100,0
25	55,5	56,7	88,2	91,2	68,3	70,1	96,2	100,0	99,9	100,0	100,0	100,0
41	52,4	54,5	91,3	92,5	75,7	76,7	98,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
61	70,1	73,3	93,8	100,0	78,2	80,3	98,2	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Reserva Casa Forte	98,0	100,0	99,9	100,0	99,7	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Reserva de pintura	46,9	48,3	88,6	88,9	91,6	96,1	99,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Conservação de pintura	28,0	29,4	54,9	55,7	47,6	57,7	81,0	90,2	86,8	100,0	86,8	86,8
Capela das Albertas	80,8	82,3	98,5	100,0	85,8	86,4	99,3	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Considerando todas as salas, é possível observar quatro períodos distintos em termos de temperatura, correspondentes às quatro estações do ano. A estação de Inverno apresenta-se estável com temperaturas baixas, a Primavera e o Outono correspondem a períodos de transição e o Verão mostra-se estável com temperaturas altas. Posto isto, julgou-se interessante apresentar os limites sustentáveis de temperatura e humidade relativa por estações do ano, ou seja, para cada estação foi definido um valor máximo e outro mínimo de cada parâmetro.

Na Tabela 6.6 apresentam-se os valores dos limites sustentáveis de temperatura e humidade relativa para cada sala em cada estação do ano. É possível verificar que os limites sugeridos pela metodologia FCT-UNL são menos rigorosos comparativamente com os limites actualmente impostos ao Museu (20-22 °C para a temperatura e 50-60 % para a humidade relativa).

Tabela 6.5: Limitação dos ciclos diários.

Salas	Limites impostos pela UNI 10829		Ciclos diários típicos		Ciclos diários sustentáveis	
	Δt [°C]	ΔHr [%]	Δt [°C]	ΔHr [%]	Δt [°C]	ΔHr [%]
13	1,5	6,0	0,7	11,9	1,5	11,9
12	1,5	6,0	0,9	11,0	1,5	11,0
11	1,5	6,0	1,0	12,3	1,5	12,3
16	1,5	6,0	1,1	10,9	1,5	10,9
25	1,5	6,0	2,6	12,3	2,6	12,3
41	1,5	4,0	1,6	9,9	1,5	9,9
61	1,5	6,0	2,2	10,1	2,2	10,1
Reserva Casa Forte	1,5	4,0	0,3	5,4	1,5	5,4
Reserva de pintura	1,5	6,0	0,5	5,2	1,5	6,0
Conservação de pintura	1,5	6,0	1,3	18,5	1,5	18,5
Capela das Albertas	1,5	4,0	0,6	7,9	1,5	7,9

Tabela 6.6: Limites sustentáveis de temperatura e humidade relativa.

Sala	Estações	Temperatura [°C]					Humidade relativa [%]							
		18	20	22	24	26	40	45	50	55	60	65	70	75
13	Inverno													
	Primavera													
	Verão													
	Outono													
12	Inverno													
	Primavera													
	Verão													
	Outono													
11	Inverno													
	Primavera													
	Verão													
	Outono													
16	Inverno													
	Primavera													
	Verão													
	Outono													
25	Inverno													
	Primavera													
	Verão													
	Outono													
41	Inverno													
	Primavera													
	Verão													
	Outono													
61	Inverno													
	Primavera													
	Verão													
	Outono													
Reserva Casa Forte	Inverno													
	Primavera													
	Verão													
	Outono													
Reserva de pintura	Inverno													
	Primavera													
	Verão													
	Outono													
Conservação de pintura	Inverno													
	Primavera													
	Verão													
	Outono													
Capela das Albertas	Inverno													
	Primavera													
	Verão													
	Outono													

7. Conclusões

7.1. Principais conclusões

Através do estudo realizado com base nos registos climáticos referentes ao ano de 2014, foi possível caracterizar o comportamento do clima interior do MNAA.

Foi efectuada uma análise geral do microclima interior, onde se avaliou a influência das solicitações exteriores. Foi possível concluir que o Museu apresenta um microclima muito estável, sujeito a reduzidas variações de temperatura e humidade relativa, não acompanhando as maiores diferenças verificadas no exterior. A construção do edifício, com paredes de elevada espessura e grande massa, sugeria que fosse expectável verificar o efeito da inércia térmica sob o microclima interior. Contudo, tal não se verificou, o que pode ser justificado pela presença de um sistema de climatização. Os valores de temperatura e humidade relativa interior não apresentam qualquer padrão de variação, mantendo-se razoavelmente constantes ao longo do ano, o que confirma a existência de um ambiente controlado.

Uma vez que as salas de reserva têm uma ocupação intermitente e permanecem grande parte do dia fechadas, verificam-se variações de valores de temperatura e humidade relativa mais reduzidas face às salas de exposição. Na sala de conservação de pintura foram observados valores de temperatura bastante constantes. No entanto, no que diz respeito à humidade relativa, os valores variam em larga escala. Esta variação pode ser justificada pelo facto das janelas permanecerem abertas durante grande parte do dia, aproximando os registos interiores e exteriores de humidade relativa. A Capela das Albertas é um espaço não climatizado inserido num edifício antigo, por essa razão era expectável que fosse notório o efeito da inércia térmica sob o seu ambiente interior. Contudo, tal não se observou, o que parece indicar que o seu microclima interior é influenciado pelo sistema de climatização do Museu, devido à ligação existente entre os dois. Através dos registos horários de humidade relativa foi ainda possível concluir que não existem valores que possam constituir risco de condensações superficiais.

Os ciclos diários de temperatura e humidade relativa confirmam a existência de um ambiente controlado, na medida em que foram registadas amplitudes reduzidas. Além disso, permitem confirmar o que anteriormente se adiantou, que as salas de exposição apresentam amplitudes mais elevadas para ambos os parâmetros, comparativamente às salas de reserva.

Apesar da presença do sistema de climatização existente no Museu, as solicitações exteriores parecem ter alguma influência no microclima interior, tal facto confirma-se aquando a análise da influência da orientação e exposição, onde são comparados os comportamentos de algumas salas.

Através do índice de desempenho, que indica a percentagem de tempo em que os valores de temperatura e humidade relativa se mantêm dentro do intervalo de valores impostos pelo Museu, é possível concluir que esse índice não apresenta resultados satisfatórios, pois em nenhuma das salas analisadas esse valor é superior a 50 %.

A utilização da especificação ASHRAE permitiu realizar uma análise baseada no risco de degradação associada aos valores de temperatura e humidade relativa. Foi possível verificar que a classe de exigência expectável para este tipo de salas – classe B - é cumprida em grande percentagem de tempo. Apesar de não cumprirem a classe durante todo o tempo, os resultados parecem indicar que as colecções não correm risco de degradação elevado.

Por um lado o Museu apresenta valores do índice de desempenho reduzidos, por outro apresenta uma boa classificação ASHRAE, o que leva a crer que os limites de temperatura e humidade relativa são desadequados ou demasiado exigentes.

Numa fase final do trabalho foi aplicada uma metodologia dinâmica intitulada FCT-UNL que permitiu definir uma faixa sustentável destes parâmetros com base no clima histórico para cada uma das quatro estações do ano. Desta forma, foi possível definir entre que valores o clima deve estar compreendido. De acordo com os conceitos de aclimatização e *proofed fluctuations*, estes novos valores, menos exigentes, parecem capazes de garantir a segurança futura das colecções.

É importante ter em atenção que a imposição destes valores ao sistema de climatização pode não ter o resultado desejado, devido a possíveis limitações do sistema e à interacção da envolvente do edifício com o exterior. O estudo elaborado reporta apenas que os riscos futuros são reduzidos caso os limites apresentados sejam cumpridos no interior de cada sala.

7.2. Desenvolvimentos futuros

De maneira a dar seguimento ao estudo realizado propõe-se alargar a análise às restantes salas do Museu e dar continuidade aos registos para os próximos anos para aumentar a robustez dos resultados. Sugere-se a aplicação de outras técnicas de avaliação de risco mecânico, biológico e químico, baseadas em resultados laboratoriais.

Uma vez que foram propostos limites de temperatura e humidade relativa, aconselha-se uma verificação do impacto destes limites em termos energéticos. Devem ser avaliadas as limitações construtivas do edifício e possíveis técnicas passivas para melhorar o seu desempenho. Seria interessante a realização de um modelo computacional do edifício, simulando vários cenários.

Por fim, propõem-se a realização de campanhas de medições das condições higrotérmicas interiores em outros museus Portugueses e edifícios históricos, de forma a criar uma rede nacional de recomendações de limites sustentáveis. Desta forma, será possível fortalecer o presente estudo e confirmar as tendências verificadas.

Bibliografia

- [1] SILVA, H.E.; HENRIQUES, F.M.A. - *A investigação ao serviço do mercado. Abordagem dinâmica no estudo microclimático em edifícios históricos*. Construção Magazine, Volume 65, págs. 24-29, 2015.
- [2] CAMUFFO, D. - *Microclimate for Cultural Heritage*. Amsterdam, Elsevier, 1998.
- [3] VUERICH, E. - *Indoor measurements of microclimate variables and ozone in the church of San Vincenzo (Monastery of Bassano Romano - Italy): A pilot study*. Microchemical Journal, Volume 88, págs. 218-223, 2008.
- [4] HENRIQUES, F.M.A. - *Comportamento Higrotérmico de Edifícios*. Lisboa, FCT-UNL, 2011.
- [5] SILVA, H.E.; HENRIQUES, F.M.A. - *Estudo do microclima da Igreja da São Cristovão*. Congresso Construção, Coimbra, 2012.
- [6] HENRIQUES, F.M.A. - *Humidade em Paredes*. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1994.
- [7] SILVA, H.E.; HENRIQUES, F.M.A. - *Análise microclimática de um edifício histórico em clima temperado: limites sustentáveis para a correta conservação dos materiais*. Ambiente Construído, Volume 15, nº2, págs. 7-16, 2015.
- [8] SILVA, H.E. - *Avaliação do Clima Interior de uma Igreja em Lisboa*. Dissertação de Mestrado. Lisboa, FCT- UNL, 2012.
- [9] LEANDRO, C. - *Avaliação do Clima Interior da Igreja de São Cristóvão em Lisboa*. Dissertação de Mestrado. Lisboa, FCT-UNL, 2014.
- [10] *Princípios para a conservação e o restauro do património construído*, Carta de Cracóvia - 2000.
- [11] DECRETO-LEI nº 55/2001 de 15 de Fevereiro.
- [12] Lei nº 47/2004 de 19 de Agosto. *Lei Quadro dos Museus Portugueses*.
- [13] WARD, P. - *The nature of Conservation - A race against time*. The Getty Consevation Institute, 1989.
- [14] CASANOVAS, L - *Conservação Preventiva e Preservação das Obras de Arte*. Lisboa. Santa Casa da Misericórdia de Lisboa, 2008.
- [15] FERREIRA, C. - *Importância da Inércia Higroscópica em Museus*. Dissertação de Mestrado. Porto, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.

- [16] MECKLENBURG, M. - *Applying science to the question of museum climate*. Padfield T. and K. Borchersen, editors, 2007.
- [17] BROWN, J.; ROSE, W. - *Development of humidity recommendations in museums and moisture control in buildings*, s/d. <http://cool.conservations.org/byauth/brownjp/humidity1997.html> (acedido em 08/07/2015).
- [18] FERREIRA, C. - *Inércia higroscópica em musues instalados em edifícios antigos*. Tese de Doutoramento. Porto, Faculdade Engenharia da Universidade do Porto, 2015.
- [19] The Getty Conservation Institute - *Conservation Perspectives*. The GCI Newsletter, Collection Environments, Volume 29, nº 2, 2014.
- [20] BRATASZ, L. - *Allowable microclimatic variations in museums and historic buildings: reviewing the guidelines*. Climate for collections, Standards and uncertainties. Munich, 2012.
- [21] THOMSON, G. - *The museum environment*. Second edition. Oxford, Elsevier Butterworth-Heinemann, 1986.
- [22] MICHALSKI, S. - *Relative humidity: a discussion of correct/incorrect values*. ICOM Committee for Conservation 10th Triennial Meeting, Washington, 1993.
- [23] CAMUFFO, D. - *Indoor air quality at the Correr Museum, Venice, Italy*. *Science of the Total Environment*, Volume 236, págs 135-152, 1999.
- [24] CAMUFFO, D. - *Environmental monitoring in four European museums*. *Atmospheric Environment*, Volume 35, págs 127-140, 2001.
- [25] CAMUFFO, D. *et al.* - *The microclimate inside the Pollaiuolo and Botticelli rooms in the Uffizi Gallery, Florence*. *Journal of Cultural Heritage*, Volume 3, págs 155-161, 2002.
- [26] UNI 10829 - Beni di interesse storico e artistico – Condizioni ambientali di conservazione - Misurazione ed analisi, 1999.
- [27] MICHALSKI, S. - *Relative humidity and temperature guidelines: what's happening?* s/d. <http://www.musecc.com/wp-content/uploads/2010/12/Relative-Humidity-and-Temperature-Guidelines.pdf>. (acedido em 11/08/2015).
- [28] MARTENS, M. - *Climate Risk Assessment in Museums: Degradation risks determined from temperature and humidity*. Eindhoven, Eindhoven University of Technology, 2012.
- [29] AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATION AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, ASHRAE Handbook HVAC Applications: Museums, galleries, archives and libraries, Atlanta, 2007.
- [30] MICHALSKI, S. - *The ideal climate, risk management, the ASHRAE chapter, proofed fluctuations, and towards a full risk analysis model. Experts roundtable on sustainable climate management strategies*. Los Angeles, The Getty Conservation Institute, 2007.

- [31] Coleção Temas de Museologia - *Plano de Conservação Preventiva – Bases orientadoras, normas e procedimentos*. Lisboa, Instituto Português dos Museus e da Conservação, 2007.
- [32] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) - EN 15757:2010 - *Conservation of Cultural Property Specifications for temperature and relative humidity to limit climate-induced mechanical damage in organic hygroscopic materials*. Italia, CEN, 2010.
- [33] SILVA, H.E.; HENRIQUES, F.M.A. - *Microclimatic analysis of historic buildings: A new methodology for temperate climates*. Building and Environment, nº82, págs 381-387, 2014.
- [34] BSI GROUP. PAS 198 – *Specification for managing environmental conditions*, 2011.
- [35] SILVA, H.E.; HENRIQUES, F.M.A. - *Hygrothermal analysis of historic buildings - Statistical methodologies and their applicability in temperate climates*. ISBP 2015 - 1st International Symposium on Building Pathology, 2015.
- [36] SILVA, H.E.; HENRIQUES, F.M.A. - *Preventive conservation of historic buildings in temperate climates. The importance of a risk-based analysis on the decision-making process*. Energy and Buildings, Volume 107, págs 26-36, 2015.
- [37] SEDLBAUER, K. - *Prediction of mould fungus formation on the surface of and inside building components*. Stuttgart, Fraunhofer Institute for Building Physics, 2001.
- [38] REILLY, J. *et al.* - *New Tools for Preservation -Accessing Long-term Environmental Efforts on Library and Archives Collection*. Washington, Commission on Preservation and Access, 1995.
- [39] Museu Nacional de Arte Antiga, s/d. <http://www.museudearteantiga.pt/>. (Acedido em 20/04/2015).
- [40] Património Cultural – Direcção-Geral do Património Cultural, s/d. <http://www.patrimoniocultural.pt/>. (Acedido em 21/05/2015).
- [41] Museus do Mundo - *Museu Nacional de Arte Antiga*. Centro Editor PDA, 2005.
- [42] MARTINS, H. - *O Museu Nacional de Arte Antiga, o edifício e a sua história: contributos para um projeto de comunicação*. Trabalho de Projeto de Mestrado em Museologia. Lisboa, Faculdade de Ciências Sociais e Humanas - Universidade Nova de Lisboa, 2014.
- [43] Instituto Português do Mar e da Atmosfera, s/d. <http://www.ipma.pt/>. (Acedido em 20/06/2015).
- [44] Atlas Climático Ibérico - Temperatura do ar e precipitação (1971-2000). Agência Estatal de Meteorología; Ministério de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino; Instituto de Meteorologia de Portugal, 2011.
- [45] Instituto Português do Mar e da Atmosfera, I.P. Boletim Climatológico Anual - Ano 2014. Lisboa, 2014.

- [46] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) - EN 15758:2010 - *Conservation of cultural property e procedures and instruments for measuring temperatures of the air and the surface of objects*. Italia, CEN, 2010.
- [47] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) - EN 16242:2012 - *Conservation of cultural heritage e procedures and instruments for measuring humidity in the air and moisture exchanges between air and cultural property*. Bélgica, CEN, 2012.
- [48] CORGNATI, S. *et al.* - *A methodology for microclimatic quality evaluation in museums: Application to a temporary exhibit*. Building and Environment, Volume 44, págs 1253-1260, 2009.
- [49] CORGNATI, S.; FILIPI, M. - *Assessment of thermo-hygrometric quality in museums: Method and in-field application to the "Duccio di Buoninsegna" exhibition at Santa Maria della Scala (Siena, Italy)*. Journal of Cultural Heritage, Volume 11, págs. 345-349, 2010.