

DIGITAL TWIN PARA O CONTROLO DAS CONDIÇÕES AMBIENTAIS DE ESPAÇOS MUSEOLÓGICOS

David Pereira⁽¹⁾, Romeu Vicente⁽¹⁾, Odete Paiva⁽²⁾, Sónia Isidro⁽²⁾, Ricardo Almeida^{(3), (4)}

(1) CERIS, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Campus Universitário de Santiago, Aveiro, 0009-0003-1587-8297, 0000-0002-5456-16421

(2) Museu Nacional Grão Vasco, Portugal, 0000-0003-1440-3030, 0009-0006-0756-8442

(3) Departamento de Engenharia Civil do Instituto Politécnico de Viseu, Viseu, 0000-0002-9846-6081 2

(4) CONSTRUCT-LFC, Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, Portugal

Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um Digital Twin do edifício do Museu Nacional Grão Vasco, em Viseu, focado na monitorização das condições ambientais interiores dos espaços/compartimentos que afetam o estado de conservação de um acervo de pintura quinhentista, com destaque para as obras de Mestre Vasco Fernandes. O objetivo do modelo é disponibilizar informação para apoiar decisões de conservação preventiva, reduzindo o risco de danos do acervo devido a solicitações higrótérmicas excessivas.

A metodologia proposta integra uma rede de sensores IoT de temperatura e humidade relativa, cujos dados são recolhidos e armazenados numa base de dados, sendo de seguida tratados e agregados em Node-RED para posterior envio para uma plataforma Digital Twin, onde é construído o modelo de visualização BIM-based. No Digital Twin é possível consultar e tratar, em tempo real, os valores das condições ambientais interiores dos compartimentos em estudo, representar mapas espaciais e explorar séries temporais de longo e curto prazo.

Os dados recolhidos e armazenados alimentam um sistema de alertas, baseado em limites de temperatura e humidade relativa definidos a partir dos intervalos recomendados para diferentes materiais e tipologias de objetos museológicos. A abordagem permite relacionar limites de exposição admissíveis com o comportamento real do edifício, identificando espaços/compartimentos e períodos críticos.

O caso de estudo demonstra o potencial da integração BIM + IoT + Digital Twin em contexto de manutenção do património edificado, contribuindo para estratégias de gestão e conservação mais informadas, e ilustrando um caminho replicável para outros museus e edifícios com interesse e relevância patrimonial.

1. Introdução

A integração de novas tecnologias, como o DT (Digital Twin) e a Internet of Things (IoT), é obviamente uma excelente oportunidade para enfrentar problemas existentes no setor dos edifícios históricos, incluindo regulamentação inadequada, baixo desempenho, comunicação não otimizada, fragmentação do fluxo de informação e falta de capacidade de decisão com informação de suporte e de confiança por parte das entidades gestoras dos edifícios [1], [2].

A tecnologia DT permite melhorar o desempenho dos edifícios em tempo real, através da criação de uma réplica digital do edifício, garantindo que a entidade responsável pela sua gestão se mantém informada e atualizada. Este processo assenta na integração de um modelo BIM com sensores IoT, possibilitando, por exemplo, a avaliação das condições higrotérmicas no interior dos espaços. Adicionalmente, pode ainda facilitar a análise dos impactos de diferentes medidas de mitigação e, dessa forma, apoiar na gestão inteligente dos ativos [3].

Este estudo centra-se na caracterização e monitorização higrotérmica dos espaços interiores de um museu. Para esse efeito, foi desenvolvido um DT detalhado do edifício, que permite acompanhar e monitorizar a temperatura e a humidade relativa em diferentes compartimentos. O caso de estudo é o Museu Nacional Grão Vasco, em Viseu, dando-se especial enfoque aos espaços que acolhem obras classificadas como tesouros nacionais. Neste documento apresenta-se uma breve revisão do estado da arte, a descrição da metodologia utilizada e a sua implementação no caso de estudo, os resultados obtidos e, por fim, as conclusões da investigação.

2. Trabalhos relacionados

No contexto do património cultural, o conceito de DT teve origem na representação digital de artefactos através de modelos digitais 3D, como sinónimo de uma réplica digital do artefacto ou estrutura histórica. As primeiras representações têm origem no século XX no ramo da arqueologia, assentando essencialmente em reconstruções visuais do passado. Esta abordagem evoluiu rapidamente para documentar a forma dos artefactos, monumentos e locais históricos. Ao longo do tempo, foi-se tornando evidente o potencial destas técnicas para a preservação e documentação de informação, que pode ser armazenada e vinculada ao modelo 3D. Dessa forma, começou-se a anexar informações aos modelos 3D, nomeadamente relativas aos materiais usados em diferentes partes ou ao histórico de intervenções de conservação. Nestes casos, toda a informação relacionada ao património em causa é gerida a partir de um processo holístico já existente que é a metodologia BIM (Building Information Modelling).

O DT pode ser encarado como uma evolução do modelo BIM, que consiste na representação virtual de um sistema físico, que é atualizado por troca de informações entre o sistema físico e o virtual, combinado em cinco dimensões: entidades físicas, modelos virtuais, serviços, dados e conexões [4].

Na literatura, encontram-se várias tentativas de definir o nível de maturidade de um DT. Sugiyama et al. [5], propõem um modelo de maturidade para o conceito Heritage Digital Twin (HDT) sustentado em quatro atributos, respetivamente: fidelidade, sincronização, inteligência e autonomia. Xin et al. [6], sugerem a criação do conceito Cultural Heritage Digital Twin (CHDT), que consiste na integração da tecnologia de DT com a proteção, salvaguarda e utilização do património cultural. Em suma, é construído um ambiente virtual através do

mapeamento digital de todos os elementos e entidades patrimoniais, com uma ligação bidirecional e em tempo real entre o património físico e o seu gémeo digital, possibilitando e potenciando a monitorização, simulação, previsão e reutilização inovadora.

Na gestão de edifícios com funções museológicas, o DT tem-se afirmado como uma ferramenta diversificada e versátil. No domínio da conservação e restauro, destaca-se a criação de um modelo DT da obra *Mona Lisa*, com o objetivo de monitorizar a propagação de fissuras, bem como controlar e simular possíveis riscos associados às suas propriedades higromecânicas [7]. No que diz respeito ao estudo do desempenho estrutural de edifícios, a literatura apresenta exemplos de modelos HBIM integrados com sistemas de monitorização estrutural, permitindo a monitorização através de dados recolhidos por sensores e a alimentação de modelos numéricos para suporte à decisão, sendo disso exemplo o trabalho de Machete et al. Existem também plataformas que, embora tendo sido desenvolvidas especificamente para curadores, permitem ao público em geral ter uma experiência mais imersiva sobre as obras do museu [9]. Observam-se também grandes avanços no uso de DT para o controlo do ambiente interno de espaços históricos. Por exemplo, o Teatro da cidade de Norrköping cria um DT para monitorizar em tempo real vários parâmetros do ambiente interior, especificamente flutuações de humidade relativa [10].

3. Metodologia

A metodologia desenvolvida neste trabalho tem como objetivo a criação de um DT do Museu Nacional Grão Vasco, em Viseu, focado na monitorização das condições ambientais interiores dos espaços de exposição. O acompanhamento destes parâmetros é fundamental para garantir o estado de conservação do acervo de pintura quinhentista existente no edifício. A aquisição de dados em tempo real é fundamental para detetar eventuais condições desfavoráveis e, a partir dessa informação, criar alertas dirigidos aos responsáveis de operação e controlo do edifício, possibilitando uma intervenção imediata que garanta a preservação e a integridade das peças do museu.

A metodologia adotada inclui as seguintes etapas: (i) levantamento arquitetónico dos compartimentos a analisar e respetiva modelação; (ii) seleção e instalação de sensores para monitorização do ambiente interior e exterior; (iii) tratamento e armazenamento dos dados recolhidos numa base de dados; (iv) integração dos dados dos sensores no modelo 3D do museu, com visualização em tempo real; e (v) implementação de alertas de risco com base em limites admissíveis de temperatura e humidade relativa.

A campanha de monitorização no Museu Nacional Grão Vasco centra-se na caracterização higrotérmica dos espaços interiores que acolhem tesouros nacionais, incluindo pinturas e esculturas, com enfoque na preservação da coleção. Para esse efeito, é necessária uma monitorização do edifício, permitindo acompanhar a temperatura e a humidade relativa nos diferentes compartimentos onde se encontram as obras de arte e analisar de que forma estes parâmetros, entre outros, influenciam, ao longo do tempo, as estratégias e ações de conservação. A etapa de seleção e instalação de sensores inclui a caracterização higrotérmica do ambiente interior do edifício, ou seja, a medição da temperatura e da humidade relativa, e o registo das condições climáticas exteriores, neste caso, através da instalação de uma estação meteorológica que regista os seguintes parâmetros: humidade relativa, radiação solar, temperatura, velocidade e direção do vento e precipitação.

A Figura 1 sintetiza as diferentes etapas da metodologia adotada na investigação.

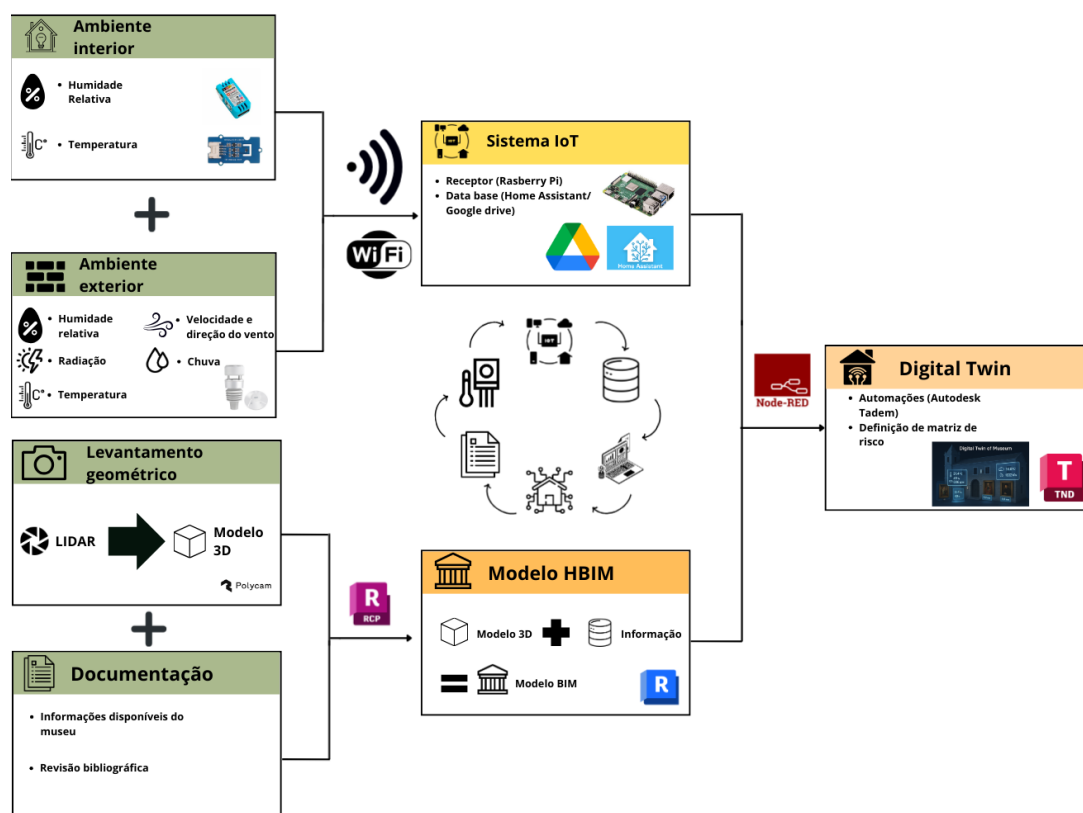


Figura 1: Esquema da metodologia

4. Caso de estudo - Museu Nacional Grão Vasco

A metodologia anteriormente descrita foi aplicada num museu, designadamente o Museu Nacional Grão Vasco, em Viseu. O edifício do museu corresponde ao Paço dos Três Escalões, mandado construir no ano de 1593, tendo sido alvo de várias obras de manutenção e reparação ao longo dos anos.

A primeira etapa da investigação consistiu na criação do modelo HBIM do edifício, isto é, uma representação digital do edifício com base em documentação histórica, levantamentos arquitetónicos, identificação de anomalias, entre outros elementos. O principal propósito deste modelo é documentar, analisar e apoiar a gestão de conservação do edifício.

No processo de criação do modelo HBIM foi efetuada, numa fase inicial, a recolha do máximo de informação relevante para a investigação, incluindo plantas e desenhos do edifício, registo de intervenções de restauro concluídas, caracterização dos materiais de construção, história do edifício e registos históricos de temperatura e humidade relativa já existentes no museu.

A segunda fase centrou-se na aquisição de dados para a representação digital do edifício, recorrendo ao sensor LiDAR integrado num iPad Pro. O LiDAR (Light Detection and Ranging) é uma tecnologia de captura da realidade que mede distâncias através de impulsos de luz (laser) e do registo de tempo que essa luz demora a regressar. A partir destas medições é possível gerar uma nuvem de pontos tridimensional. Após o levantamento, a nuvem de pontos foi tratada no

software *Autodesk ReCap*, removendo-se o ruído captado até se obter uma nuvem de pontos adequada à modelação, com dimensões e geometria explícitas.

Por fim, reunidos os elementos necessários, iniciou-se a criação do modelo HBIM no software *Autodesk Revit*. Para dar início à modelação, foram importadas para o ambiente do Autodesk Revit as plantas disponíveis e as nuvens de pontos processadas no *Autodesk ReCap*, garantindo-se o correto alinhamento e georreferenciação dos dados. A partir desta base, procedeu-se à modelação tridimensional do edifício (paredes, pavimentos, coberturas, vãos, escadas e elementos arquitetónicos relevantes), respeitando a geometria captada e as características construtivas identificadas. A Figura 2 mostra o modelo de nuvem de pontos do interior do edifício e a modelação em *Autodesk Revit*.

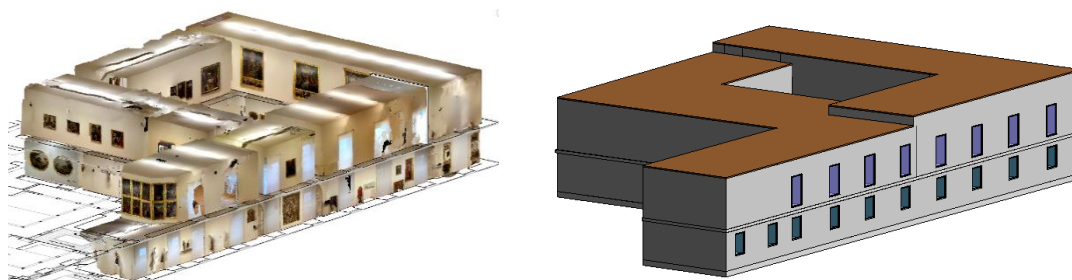


Figura 2: Importação das nuvens de pontos limpas (*Autodesk Recap*) para o *Autodesk Revit* e respetiva modelação.

Em paralelo, foi efetuada a organização e estruturação do modelo por níveis, fases e categorias, permitindo uma gestão consistente da informação ao longo do tempo e facilitando a posterior utilização do DT.

4.1 Setup de sensores e respetivas configurações

Com o modelo geométrico finalizado iniciou-se a instalação e configuração do sistema de sensores para monitorizar os compartimentos interiores. A temperatura e a humidade relativa são medidas com sensores SCD35 com precisão $\pm 0,1$ °C e $\pm 1,5\%$ e resolução 0,01 °C e 0,01% para temperatura e humidade relativa, respetivamente. Os sensores foram colocados criteriosamente junto às luminárias, de forma a ficarem discretos e sem influência direta dos visitantes e de fontes pontuais de calor (ver Figura 3b). No total, foram instalados 16 sensores distribuídos por 16 compartimentos. As condições climáticas exteriores são monitorizadas através de uma estação meteorológica GW2001 WittBoy instalada na cobertura do edifício (Figura 3c).

Tanto no exterior como no interior, o sistema de monitorização baseia-se na leitura de parâmetros ambientais através de sensores de elevada precisão. Estes sensores estão ligados a um microcontrolador através de interfaces de comunicação I²C, sendo que o microcontrolador recolhe periodicamente as leituras (ver Figura 3^a).

A campanha de monitorização decorreu entre 1 de janeiro de 2026 e 1 de fevereiro de 2027, correspondendo a um período total de 13 meses. Durante este intervalo, os dados ambientais interiores e exteriores foram adquiridos com uma resolução temporal de 5 minutos de forma contínua. A duração da campanha foi definida de modo a abranger um ciclo anual completo, permitindo captar a variabilidade sazonal das condições higrotérmicas e realizar uma análise representativa do comportamento ambiental ao longo de todo o ano. Ainda assim, o objetivo do

sistema implementado não se limita a uma campanha temporalmente fechada, pretendendo-se a sua manutenção em funcionamento contínuo a longo prazo, de forma a assegurar a monitorização permanente do edifício e o acompanhamento da evolução das condições ambientais.

Todo o processamento e armazenamento são geridos por um computador Raspberry Pi (RPi), que recebe os dados através de uma rede Wi-Fi instalada no local. No RPi, é executado um ambiente virtualizado através da plataforma Home Assistant (HA), uma plataforma *open-source* que armazena localmente a informação adquirida. Esta plataforma permite a configuração dos microcontroladores ligados aos sensores, incluindo a definição das taxas de aquisição, calibração, conversão de unidades e filtragem de valores anómalos (*outliers*). O HA permite ainda configurar o envio automático das leituras dos sensores para a rede local via Wi-Fi. Os dados podem ser armazenados localmente num disco SSD ligado ao Raspberry Pi ou através de cópias de segurança na nuvem, como, por exemplo, o Google Drive.

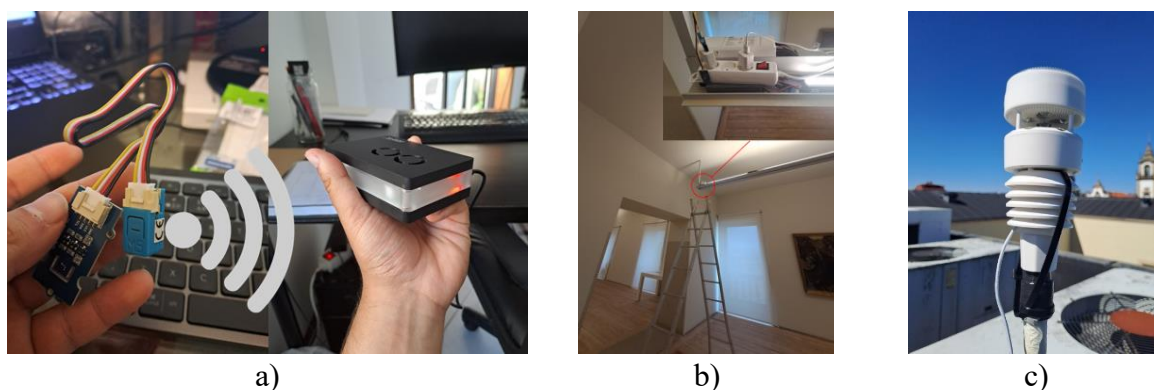


Figura 3: Sistema de monitorização e instrumentação: a) conjunto sensor-microcontrolador e Raspberry Pi; (b) Instalação dos sensores de temperatura e humidade relativa; (c) estação meteorológica a registar condições exteriores

4.2 Integração com o modelo 3D

Para a integração e visualização operacional dos dados do microclima no modelo 3D, seleccionou-se a plataforma *Autodesk Tandem*, que foi ligado ao HA através do Node-RED. As variáveis ambientais monitorizadas (temperatura, humidade relativa) são adquiridas no HA separadamente por compartimento (e.g., C1.2, C2.1, C2.2, C2.3, C2.4...), bem como os parâmetros recolhidos na estação meteorológica exterior. No Node-RED, as entidades do HA referentes a temperatura e humidade relativa alimentam fluxos dedicados por compartimento. Em cada fluxo, o *entity_id* é mapeado para chaves canónicas (por exemplo, C2_1_Temp e C2_1_RH) e as leituras de temperatura e humidade relativa são combinadas através de um nó *merge-join*. Por fim, é construído um *payload* com carimbo temporal (ISO 8601) e os dados são enviados ao *Autodesk Tandem* através de pedidos HTTP (POST), com periodicidade definida. A Figura 4 mostra o *pipeline* de comunicação em Node-RED para automatização do envio dos dados adquiridos para o ambiente 3D no *Autodesk Tandem*.

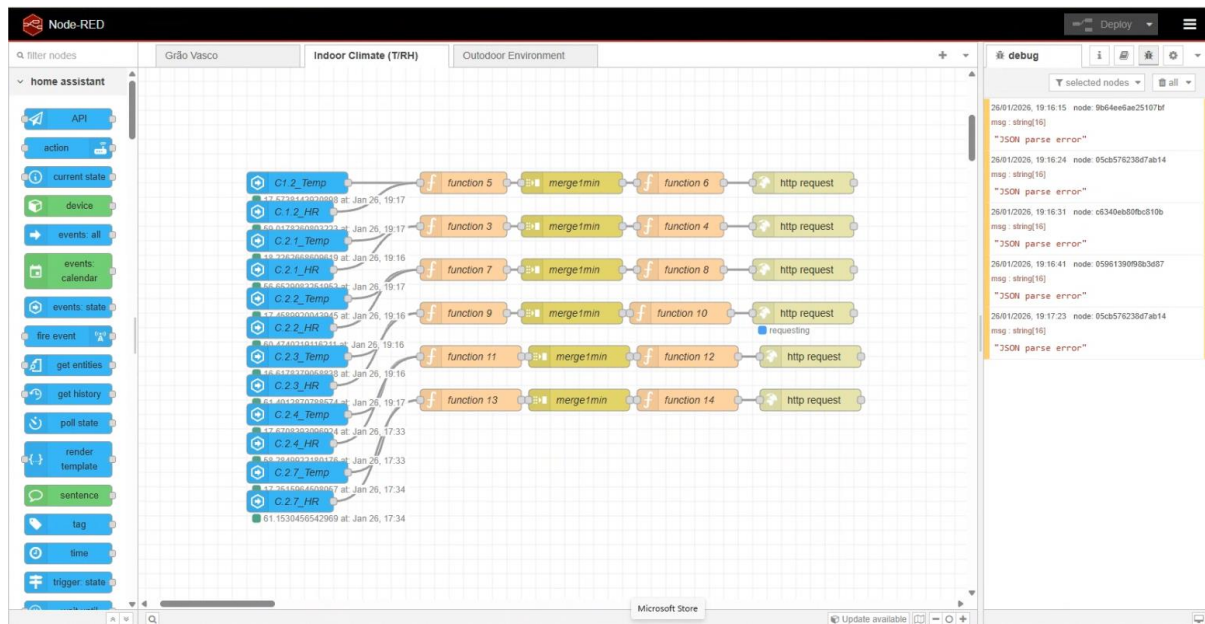


Figura 4: Pipeline de comunicação em Node-RED.

No Tandem, foi preparado um *Facility Template* que inclui classes personalizadas para os compartimentos (*Rooms*) e para a estação meteorológica (*Room Exterior*), consolidando os parâmetros de interesse (temperatura e humidade relativa interior por compartimento, e parâmetros climáticos exteriores). Para cada parâmetro dinâmico, foi configurado um *data stream* e a respetiva ligação, associada via JSONPath, à chave correspondente produzida pelo Node-RED. Esta ligação disponibiliza os dados dos sensores em tempo real nas tabelas e gráficos do Tandem, permitindo a visualização espacial por compartimento (incluindo *heatmaps* quando aplicável). Esta configuração também permite a centralização de informação complementar associada a cada espaço, como, por exemplo, a identificação do compartimento, função, localização, observações relevantes, registo de anomalias/danos, histórico de intervenções e áreas/compartimentos de interesse para a monitorização ambiental, e à estação meteorológica, como, por exemplo, o tipo de equipamento, posicionamento e metadados de instalação.

A Figura 5 mostra a interface do modelo 3D no *Autodesk Tandem* para o piso 2, incluindo um mapa térmico (*heat map*) resultante da leitura de temperatura em tempo real, o painel de propriedades do compartimento e a classificação por intervalos/níveis de risco térmico, em função de critérios estabelecidos pelo utilizador.



Figura 5: Interface do modelo 3D para o piso 2: mapa térmico (*heat map*) de temperatura em tempo real, painel de propriedades do compartimento e classificação por intervalos/níveis de risco térmico.

Relativamente ao sistema de alertas disponível no *Autodesk Tandem*, foram definidos limites de aviso (*thresholds*) para a temperatura e humidade relativa do ar por compartimento, com base em intervalos recomendados para diferentes classes de materiais e tipologias de objetos museológicos. Estes intervalos foram retirados da bibliografia específica [11], [12].

Para cada compartimento foi atribuído um intervalo específico em função do tipo de obras predominantes no local e da sua sensibilidade a variações higrotérmicas. No caso específico do Museu Nacional Grão Vasco, para além das pinturas quinhentistas (incluindo obras atribuídas a Vasco Fernandes, frequentemente suportadas em madeira e com camadas pictóricas/policromia), existem também coleções com materiais diversos, como esculturas, coleções de cerâmica, peças em marfim e mobiliário, pelo que a definição dos *thresholds* foi ajustada por sala de modo a refletir o perfil material dominante. Assim, nas salas com predominância de madeira e madeira pintada/policromada estabeleceu-se como limites 15–25 °C e 35–65 %, enquanto nos compartimentos com maior presença de cerâmica os intervalos de referência são 16–30 °C e 0–70%. Para áreas com marfim e ossos, consideraram-se os intervalos de 0–25°C e 20–65%. Estes *thresholds* suportam alertas automáticos no Tandem, ou seja, sempre que os valores medidos no local excedem os limites definidos para cada compartimento é apresentado um alerta através de um símbolo colorido.

5. Conclusões

A presente investigação apresenta uma metodologia assente na utilização da tecnologia DT para o apoio na gestão de coleções museológicas, através da recolha e tratamento de dados necessários a uma caracterização adequada do ambiente interior, com o objetivo de suportar uma estratégia de conservação preventiva. No estágio atual, a solução desenvolvida aproxima-

se sobretudo de um digital shadow, com visualização dinâmica dos dados, podendo ser entendida como um primeiro passo para a concretização de um Digital Twin mais robusto e funcional.

Os principais contributos deste trabalho consistem na criação de um modelo digital, na demonstração do *pipeline* da integração contínua dos dados do meio físico para o modelo digital e na implementação de um sistema de avisos e alertas de risco em tempo real. A metodologia desenvolvida permite uma receção contínua em tempo real de dados do interior, nomeadamente, temperatura e humidade relativa, bem como dados climáticos exteriores, potencialmente relevantes para uma análise de risco do acervo do museu.

A aplicação da metodologia neste caso de estudo demonstrou a viabilidade técnica do DT como suporte à monitorização e tomada de decisão. Esta abordagem traz benefícios relevantes ao Museu Nacional Grão Vasco, eventualmente generalizável a toda a comunidade de curadores, uma vez que a existência de uma réplica digital do edifício permite priorizar salas mais críticas, reações de atuações mais rápidas e eficazes, registos históricos para justificar intervenções de conservação e medidas de intervenção e, acima de tudo, preservar um legado histórico para as gerações vindouras. Para além disso, a implementação desta metodologia num contexto real demonstra o seu potencial de replicabilidade e adaptação a outras instituições patrimoniais com necessidades semelhantes de monitorização, conservação preventiva e apoio à decisão.

Como trabalho futuro, prevê-se o prolongamento do período de operação do sistema, de modo a permitir uma análise quantitativa mais robusta dos seus impactos na conservação das obras, nomeadamente ao nível da redução documentada de danos. Numa perspetiva de evolução metodológica, espera-se igualmente que a solução desenvolvida possa progredir de uma lógica atual de monitorização integrada para um Digital Twin em sentido mais pleno, assente numa ligação operacional contínua entre o sistema físico e a sua representação digital, com capacidade de contextualização, análise, simulação, previsão e apoio à decisão ao longo do ciclo de vida do ativo.

Agradecimentos

Este trabalho foi apoiado pela FCT — Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P., no âmbito da bolsa de doutoramento com a referência e identificador DOI: <https://doi.org/10.54499/PRT/BD/155037/2023>. Os autores agradecem ao Museu Nacional Grão Vasco (Viseu, Portugal) o apoio institucional e o acesso às coleções, e ao CERIS — Civil Engineering Research and Innovation for Sustainability (RUnit CERIS Aveiro), no âmbito do projeto UID/6438/2025. Este trabalho é ainda cofinanciado pelo COMPETE 2030, Portugal 2030 e pela União Europeia, no âmbito do projeto RiskMap — “Ferramenta de mapeamento do risco de degradação em edifícios através de inteligência artificial” — projeto n.º 14828, código de operação COMPETE2030-FEDER-00831700.

Referências

- [1] D. Lee, S. H. Lee, N. Masoud, M. S. Krishnan, and V. C. Li, ‘Integrated digital twin and blockchain framework to support accountable information sharing in construction projects’, *Autom. Constr.*, vol. 127, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.autcon.2021.103688.

- [2] B. Teisserenc and S. Sepasgozar, ‘Adoption of blockchain technology through digital twins in the construction industry 4.0: A PESTELS approach’, *Buildings*, vol. 11, no. 12, Dec. 2021, doi: 10.3390/buildings11120670.
- [3] M. Deng, C. C. Menassa, and V. R. Kamat, ‘From BIM to digital twins: A systematic review of the evolution of intelligent building representations in the AEC-FM industry’, *Journal of Information Technology in Construction*, vol. 26, pp. 58–83, 2021, doi: 10.36680/J.ITCON.2021.005.
- [4] F. Niccolucci and A. Felicetti, ‘Digital Twin Sensors in Cultural Heritage Ontology Applications’, *Sensors*, vol. 24, no. 12, Jun. 2024, doi: 10.3390/s24123978.
- [5] G. Sugiyama, I. Bourgeois, and H. Rodrigues, ‘A holistic methodology for the assessment of Heritage Digital Twin applied to Portuguese case studies’, *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, vol. 36, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.daach.2024.e00390.
- [6] L. Xin, G. Hongyu, S. E. Kyeong, W. Qitao, Y. Guojun, and D. Bangkun, ‘Towards Cultural Heritage Digital Twin: Concept, Characteristics, Framework and Applications’, in *2023 9th International Conference on Virtual Reality, ICVR 2023*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023, pp. 549–557. doi: 10.1109/ICVR57957.2023.10169702.
- [7] R. Lorenzo *et al.*, ‘Learning from objects: The use of advanced numerical methods to exploit a complete set of information from experimental data, for the Mona Lisa’s Digital-Twin’, in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing Ltd, Nov. 2020. doi: 10.1088/1757-899X/949/1/012089.
- [8] R. Machete, M. Neves, M. Ponte, A. P. Falcão, and R. Bento, ‘A BIM-Based Model for Structural Health Monitoring of the Central Body of the Monserrate Palace: A First Approach’, *Buildings*, vol. 13, no. 6, Jun. 2023, doi: 10.3390/buildings13061532.
- [9] I. Yeom and W. Woo, ‘Digital twin as a mixed reality platform for art exhibition curation’, in *Proceedings - 2021 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops, VRW 2021*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Mar. 2021, pp. 424–425. doi: 10.1109/VRW52623.2021.00094.
- [10] Z. Ni, Y. Liu, M. Karlsson, and S. Gong, ‘Enabling Preventive Conservation of Historic Buildings Through Cloud-Based Digital Twins: A Case Study in the City Theatre, Norrköping’, *IEEE Access*, vol. 10, pp. 90924–90939, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3202181.
- [11] F. d’Ambrosio and V. d’Agostino, ‘Microclimate and cultural heritage’, in *uroacademy on Ventilation and Indoor Climate. Course 1 – Indoor Air and Thermal Confort*, Marie Curie Actions, 2006, pp. 90–118.
- [12] C. S. F. M. Ferreira, ‘Inércia higroscópica em museus instalados em edifícios antigos: utilização de técnicas passivas no controlo da humidade relativa interior’, Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2015.