

INTEGRAÇÃO DE SISTEMAS DE MONITORIZAÇÃO AMBIENTAL EM MODELOS BIM-FM EM EDIFÍCIOS PÚBLICOS

Marcio Morton Silva ⁽¹⁾, João Pedro Couto ⁽²⁾

(1) Universidade do Minho, Guimarães, 0009-0009-1275-9894

(2) Universidade do Minho, Guimarães, 0000-0001-9607-0596

Resumo

A crescente necessidade de eficiência e sustentabilidade na gestão de edifícios tem impulsionado o uso de metodologias digitais integradas, com destaque para o *Building Information Modelling* (BIM). Embora já numa fase de ampla consolidação nas fases de conceção e construção, o potencial do BIM na fase de Operação e Manutenção (O&M), o denominado BIM para *Facility Management* (BIM-FM), ainda se encontra num processo de implementação e consolidação relativamente incipiente. Este trabalho, desenvolvido no âmbito de um projeto de doutoramento em Engenharia Civil na Universidade do Minho, visa explorar a integração do BIM-FM com sistemas de monitorização ambiental em edifícios públicos. Para tal, foi concebido e implementado um sistema de aquisição e gestão de dados em tempo real, baseado em sensores de temperatura e humidade instalados em diferentes edificações públicas situadas no Distrito Federal (Brasil). Os dados recolhidos são enviados para uma base central e visualizados por meio de uma interface web interativa, permitindo correlacionar as condições ambientais internas com parâmetros de conforto e desempenho dos edifícios. A integração desses dados nos modelos BIM pretende oferecer suporte à tomada de decisão em estratégias de manutenção preventiva e de melhoria do conforto térmico, reforçando o papel do BIM-FM como ferramenta de apoio à gestão inteligente de ativos. Os resultados preliminares indicam o potencial da abordagem proposta para promover maior eficiência operacional e sustentabilidade dos edifícios em uso, particularmente no que concerne ao contexto da gestão de edifícios públicos.

1. Introdução

A crescente preocupação com a sustentabilidade ambiental tem assumido um papel central nos diferentes setores produtivos, em particular na indústria da Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação (AECO). Este setor é responsável por impactos ambientais significativos ao longo de todo o ciclo de vida das edificações, desde a extração e transporte de recursos naturais até às fases de uso, operação e fim de vida. Neste contexto, a academia e a prática profissional têm procurado ferramentas e metodologias capazes de apoiar os diversos stakeholders na

identificação, análise e mitigação desses impactos, promovendo uma gestão mais eficiente e sustentável do ambiente construído [1].

Composto por um conjunto de fases interdependentes que se estendem desde a conceção até ao fim de vida dos edifícios, o ciclo de vida de uma edificação apresenta uma natureza complexa e uma significativa duração temporal. Segundo [2] a fase de Operação e Manutenção (O&M) é responsável pela maior parte das emissões de carbono e dos impactos ambientais ao longo do ciclo de vida do edifício, devido ao consumo de energia e às atividades de manutenção envolvidas, o que, ao longo do tempo, reforça a necessidade de adoção de estratégias de gestão eficazes e orientadas para o desempenho sustentável dos edifícios.

A literatura atual define o BIM como um conjunto de tecnologias, processos e princípios que permitem a vários intervenientes projetar, construir e operar uma instalação de forma colaborativa num espaço virtual ao longo de todo o ciclo de vida do ativo, suportando a partilha integrada de informação e a tomada de decisão com base em modelos digitais “vivos” e ricos em dados [3].

A gestão de edifícios, incluindo a operação diária, manutenção e gestão de espaços e ativos em organizações públicas, pode ser apoiada por metodologias BIM-FM que integram dados de edifícios com processos automatizados de verificação e apoio à decisão [4].

Com o objetivo de aumentar a eficiência organizacional, o *Facility Management* (FM) assume-se como uma função organizacional que integra pessoas, lugares e processos dentro do ambiente construído com o objetivo de melhorar a qualidade de vida das pessoas e a produtividade da atividade central de uma organização [5]. FM é uma abordagem integrada que ajuda organizações a operar, manter, melhorar e adaptar os edifícios e infraestruturas de forma eficiente para suportar os principais objetivos da organização [6].

A aplicação do BIM à Gestão de Instalações (BIM-FM) envolve o uso do modelo BIM como um repositório central de dados geométricos, paramétricos e alfanuméricos para apoiar a operação, manutenção e gestão geral das instalações ao longo de seu ciclo de vida, permitindo um melhor acesso a informações atualizadas sobre os ativos e processos de tomada de decisão mais eficientes [7]. Para Ismail (2023) [8] apesar de haver um número crescente de estudos na literatura sobre BIM e construção sustentável, de forma isolada, a investigação do BIM-FM voltado a essa temática é necessária para identificar o conhecimento existente, bem como as principais lacunas de pesquisa nessa área. Neste sentido, a incorporação de sistemas de monitorização ambiental baseados em sensores, capazes de recolher dados contínuos de parâmetros como temperatura e humidade, surge como uma oportunidade para enriquecer os modelos BIM com informação dinâmica, apoiando estratégias de manutenção preventiva, melhoria do conforto térmico e otimização do desempenho dos edifícios.

Assim, o presente trabalho, enquadra-se no estudo desenvolvido no âmbito de um projeto de doutoramento em Engenharia Civil, tem como objetivo explorar a integração do BIM-FM com sistemas de monitorização ambiental aplicados a edifícios públicos, nomeadamente edifícios escolares e um edifício institucional localizado no Distrito Federal, Brasil. Por meio da recolha e gestão de dados ambientais em tempo real e da sua integração em modelos BIM, pretende-se avaliar o potencial desta abordagem como ferramenta de apoio à gestão inteligente de ativos, contribuindo para uma maior eficiência operacional e sustentabilidade dos edifícios em fase de uso.

O presente artigo encontra-se estruturado em cinco secções principais. Após a introdução, a Secção 2 enquadra o uso do BIM associado ao *Facility Management* e à monitorização ambiental no contexto da gestão de ativos, abordando, em particular, a aplicação do BIM-FM

na fase de operação e manutenção, bem como os princípios da monitorização ambiental em edifícios públicos. A Secção 3 descreve a metodologia adotada, incluindo a arquitetura geral do sistema proposto, a tipologia dos edifícios monitorizados e o processo de integração dos dados ambientais nos modelos BIM. Na Secção 4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos, destacando-se os resultados preliminares da monitorização, o contributo do sistema para o apoio à manutenção e à gestão do conforto, bem como os desafios associados à integração com plataformas de *Facility Management* existentes. Por fim, a Secção 5 sintetiza as principais conclusões do estudo e aponta perspectivas para trabalhos futuros.

2. BIM-FM e Monitorização Ambiental no Contexto da Gestão de Ativos

2.1 BIM-FM na Operação e Manutenção

Os benefícios mais frequentemente citados contemplam a capacidade de centralizar e organizar informação relevante para manutenção preventiva e corretiva, facilitar o acesso a dados como planos de manutenção, histórico de intervenções, manuais técnicos e listas de equipamentos, bem como permitir a integração com sensores e *digital twin*, os quais podem suportar manutenção preditiva. Esses usos proporcionam um trabalho mais eficiente, evita interrupções indesejadas e prolonga o tempo de disponibilidade dos equipamentos. O uso de BIM em FM também pode apoiar as estratégias de sustentabilidade, considerando que o BIM fornece uma base de dados útil para analisar a funcionalidade da edificação, bem como planejar melhoramentos, aquando da sua necessidade [8].

Para [8] apesar dos potenciais benefícios, diversos limites atuais ainda dificultam a adoção generalizada do BIM-FM na operação e manutenção. As principais limitações identificadas na literatura incluem a falta de interoperabilidade entre plataformas BIM e sistemas de gestão de manutenção, problemas com a qualidade e transferência de dados após o término da construção e a fraca definição de requisitos de informação para FM durante as fases iniciais do projeto [9]. Acresce a isto a carência de competências específicas na equipa de FM e a ausência de padrões firmes que orientem a utilização de BIM na gestão de ativos, o que restringe o valor prático da sua utilização em contextos reais de operação predial [10].

No que diz respeito ao estado da adoção em edifícios públicos, a literatura mais recente mostra que a implementação do BIM-FM ainda se encontra num estágio inicial e desigual quando comparada com o setor privado. Relatórios e revisões sistemáticas demonstram que, embora haja crescente interesse em utilizar BIM para FM em órgãos governamentais e organizações públicas, este ainda não tem sido apoiado por políticas e abordagens integradas específicas, refletindo-se num desenvolvimento embrionário e fragmentado de práticas e conhecimento. Essa lacuna é particularmente visível em estudos que investigam a aplicação de BIM-FM em edifícios públicos, como escolas e hospitais, onde se identificou uma utilização limitada e falta de padronização nos métodos de implementação [11].

Quanto à integração com processos de manutenção preventiva e corretiva, os trabalhos recentes salientam que o BIM-FM pode facilitar a evolução das estratégias tradicionais de manutenção. O uso de modelos BIM conectados a sistemas de manutenção ou a sensores *IoT (Internet of Things)* permite transitar de uma abordagem reativa — na qual a manutenção só ocorre após falha — para abordagens preventiva e preditiva, através da consulta sistemática de dados e histórico dos ativos para o planeamento de inspeções e intervenções programadas. A literatura destaca, no entanto, que a integração efetiva com sistemas existentes de manutenção ainda é

limitada pela falta de *frameworks* interoperáveis e dificuldades técnicas ligadas à exportação e atualização contínua de informação nos modelos BIM [11] [7].

2.2 Monitorização Ambiental em Edifícios Públicos

A temperatura e a humidade são determinantes críticos para o conforto térmico dos ocupantes em edifícios, influenciando diretamente o bem-estar, a saúde e a produtividade dos seus utilizadores. Estudos recentes mostram que o conforto térmico interno depende não só da temperatura do ar, mas também da humidade relativa e de fatores como a velocidade do ar e a temperatura radiante média dos ambientes, sendo estes parâmetros essenciais para promover condições térmicas adequadas em espaços interiores. A literatura demonstra que um ambiente fora dos limites de conforto pode causar desconforto, reduzir o desempenho dos ocupantes e aumentar a probabilidade de respostas fisiológicas adversas, o que é especialmente relevante em edifícios públicos onde a permanência prolongada de pessoas é frequente [12].

As variações de temperatura e humidade também impactam a durabilidade dos materiais de construção e a integridade técnica das estruturas. Estudos recentes sobre regime termo higrométrico demonstram que ciclos repetidos de aquecimento, arrefecimento e mudanças de humidade podem acelerar processos de emissão de compostos orgânicos voláteis (VOC's) e influenciar a difusão de humidade nas superfícies internas, o que pode levar à degradação de materiais, aumento de emissão de agentes químicos e redução da vida útil de componentes construtivos. Entender estes efeitos é fundamental para planos de manutenção e reabilitação em edifícios públicos, especialmente em contextos de monitorização contínua [13].

A monitorização de temperatura e humidade em espaços públicos também está intrinsecamente ligada à saúde dos ocupantes e ao uso seguro dos espaços. Condições interiores inadequadas podem resultar em desconforto, efeitos adversos à saúde como irritações respiratórias, fadiga ou aumento da propagação de agentes biológicos, e influenciar negativamente a experiência de uso, especialmente em escolas, hospitais e bibliotecas [14]. A monitorização contínua permite não só garantir níveis adequados de conforto e saúde, mas também basear decisões de operação e manutenção que favoreçam ambientes interiores mais saudáveis e seguros.

A monitorização ambiental tem sido aplicada em diversos estudos de edifícios públicos para avaliar e melhorar a qualidade dos ambientes interiores. Por exemplo, trabalhos recentes em escolas demonstraram como a monitorização contínua de temperatura e humidade em inúmeras salas de aula pode revelar variações significativas de condições térmicas entre espaços, permitindo priorizar intervenções como melhoria da climatização, ventilação ou controlos específicos para cada sala [15]. Esses dados também apoiam decisões sobre investimentos em sistemas HVAC, assegurando que os ambientes escolares atendam às necessidades de conforto e saúde dos estudantes e professores em diferentes climas e tipos de ocupação.

Para [14], a integração da monitorização ambiental com os processos de operação e manutenção (O&M) em edifícios públicos facilita decisões mais informadas e proativas. Dados contínuos de temperatura e humidade permitem identificar padrões de desempenho de sistemas HVAC, antecipar necessidades de manutenção preventiva e corrigir condições adversas antes que afetem o conforto ou a integridade física das estruturas. Em escolas e outras instituições públicas, tal monitorização pode orientar a otimização de políticas de ventilação, programação de intervenções, atualização de sistemas técnicos e até suportar a elaboração de relatórios de desempenho ambiental que fundamentem estratégias sustentáveis de O&M.

3. Metodologia

3.1 Arquitetura Geral do Sistema

De forma simplificada, a arquitetura do sistema é ordenada da seguinte forma (Figura 1):

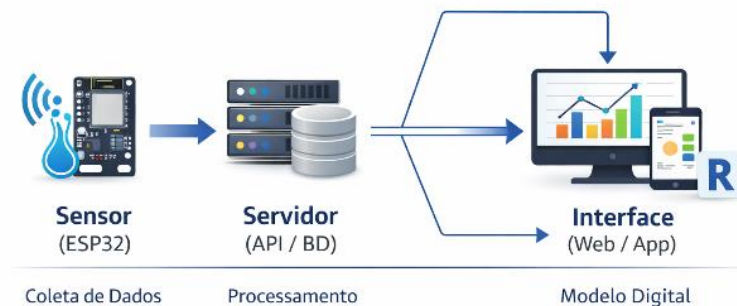


Figura 1 – Arquitetura do sistema

A coleta de dados utilizada no sistema idealizado na pesquisa e empregado para fins de monitorização ambiental é composto por uma *breadboard* de 400 pinos, um microprocessador ESP 32 CH340C WROOM e um sensor DHT 22, conforme figura abaixo (Figura 2).

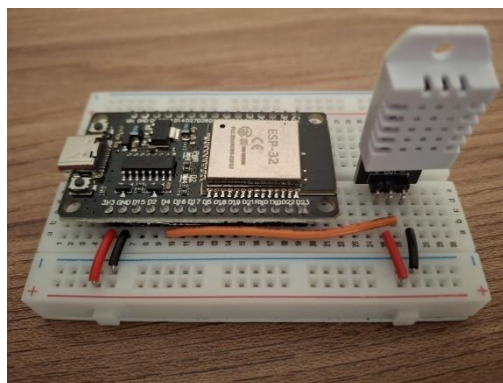


Figura 2 – Sistema de coleta de dados

O microprocessador ESP32 CH340C opera em um *clock* máximo de 240 MHz.

O uso dos sensores DHT 22 permite que sejam efetuadas medidas de temperatura entre -40°C e $+80^{\circ}\text{C}$ e umidade entre 0% e 100%. Sendo a precisão da temperatura $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ (resolução $\sim 0,1^{\circ}\text{C}$) e da umidade $\pm 2\% \text{ RH}$ (resolução $\sim 0,1\% \text{ RH}$).

A transmissão de dados é realizada por meio de protocolo *Wi-Fi*, o qual é transmitido para um banco de dados no provedor *Hetzner*. Para uma melhor visualização dos dados monitorizados, foram desenvolvidos *dashboards* que podem ser acessados conforme a seguir na Tabela 1:

Tabela 1 – Tipologias e endereços dos *dashboards*.

LOCAL	ENDEREÇO
Núcleo de Atendimento Jurídico – Paranoá (NAJ)	http://65.109.224.236/dht22_project/chart22_naj.php
Escola CED – Manguelral	http://65.109.224.236/dht22_project/chart22_ced.php
Escola CEPI – Vila Telebrasilíia	http://65.109.224.236/dht11_project/chart_cepi.php ; http://65.109.224.236/dht22_project/chart22_cepi.php

3.2 Tipologia dos Edifícios Monitorizados

Os edifícios monitorizados pertencem a categoria dos edifícios de serviços, sendo duas escolas e um destinado a assistência jurídica.



Figura 3 – Alçados das edificações

O NAJ é uma edificação térrea, com aproximadamente 342m², construída em 1997 e como início de atividades em 1998. Já a escola CED é uma edificação composta por rés do chão e 1º andar, com aproximadamente 4.968,79 m² de área, construída em 2024 e com o início de atividades em 2025. E por fim, o CEPI também é uma edificação térrea, com aproximadamente 1506,44 m², construída em 2024 e com o início de atividades em 2025.

Para cada um dos edifícios monitorizados, foi idealizada a instalação de dois conjuntos (ESP32 + sensor), totalizando seis pontos de coleta de dados. O NAJ conta com dois sistemas ESP32 + DHT 22 que iniciou as medições em 09/05/2025, efetua medições em dois ambientes (uma sala técnica para equipamentos informáticos e uma secretaria administrativa) ambos estão em plena operação até a presente data. Já a Escola CED também conta com dois sistemas ESP32 + DHT 22 que iniciou as medições em 29/04/2025, efetua medições em dois ambientes (uma sala técnica para equipamentos informáticos e um depósito de alimentos) ambos em plena operação até a presente data. Por fim, a escola CEPI inicialmente contou com um sistema composto por ESP32 + DHT11 o qual passou a monitorizar os dados a partir do dia 15/05/2025, a efetuar medições em duas salas de aula. Tais medições perduraram até o dia 10/10/2025 aquando por razões de ajustes técnicos, foram substituídos por conjuntos ESP32 + DHT22 em 28/10/2025, conjuntos estes semelhantes aos ora informados para o NAJ e o CED.

A partir da análise dos dados de monitorização, mediante observação do *dashboard da Escola CED*, que evidenciaram valores elevados de temperatura associados a níveis reduzidos de humidade relativa, especialmente em determinados períodos do ano, foi implementada uma ação corretiva com vista à melhoria das condições ambientais interiores. Nesse contexto, em cada uma das salas monitorizadas, procedeu-se à instalação de humidificadores de ar em cada

sala de aula. Esta intervenção teve como objetivo mitigar os efeitos da baixa humidade, contribuindo para a melhoria do conforto térmico e das condições de uso dos espaços.

4. Resultados e Discussão

Os dados coletados foram consolidados e analisados a partir da determinação dos valores mínimo, médio e máximo, possibilitando a caracterização dos níveis de conforto térmico aos quais os utilizadores estão expostos. **O período de coleta compreendeu os meses de abril de 2025 a janeiro de 2026**, e os respetivos resultados são apresentados nas figuras a seguir.

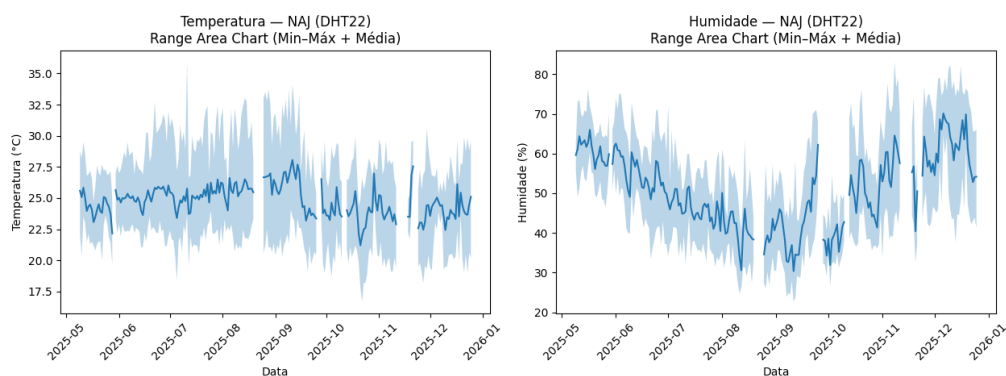


Figura 4: Resultados de temperatura (esquerda) e humidade no NAJ (direita).

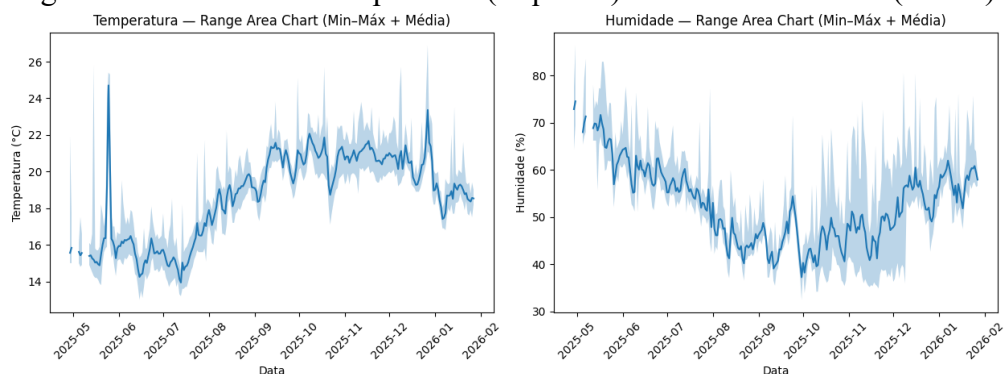


Figura 5: Resultados de temperatura (esquerda) e humidade no CED (direita).

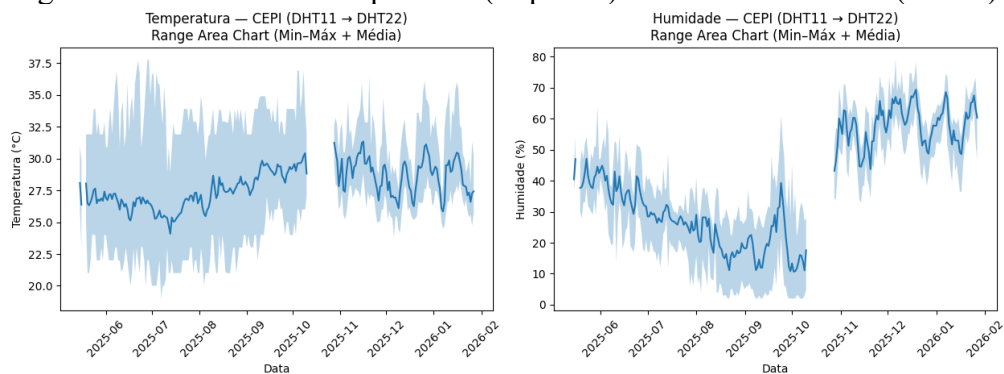


Figura 6: Resultados de temperatura (esquerda) e humidade no CEPI (direita).

As séries temporais de temperatura e humidade foram representadas por gráficos do tipo *Range Area Chart*, agregados por dia, unificando medições provenientes de sensores DHT11 e DHT22. A área sombreada indica a variação diária entre valores mínimo e máximo, enquanto a linha central representa a média.

A fim de possibilitar uma interpretação adequada dos dados apresentados, torna-se necessário o esclarecimento dos pormenores inerentes a cada edificação analisada. No NAJ, os ambientes monitorizados permanecem em uso ininterrupto de ar-condicionado, regulado à temperatura de 16 °C. A sala técnica do NAJ caracteriza-se como um ambiente sem circulação regular de pessoas, enquanto a secretaria administrativa é ocupada continuamente por quatro utilizadores durante o horário de funcionamento. Na Escola CED, os ambientes monitorizados também são climatizados à temperatura de 16 °C; a sala técnica apresenta igualmente ausência de circulação regular de pessoas, e o depósito de alimentos é acessado apenas de forma esporádica. Por fim, na escola CEPI, os ambientes monitorizados não são climatizados e, durante o horário de funcionamento, cada sala é frequentada por uma professora e doze crianças.

Esclarecidos os pormenores anteriormente descritos, infere-se, a partir da análise dos gráficos, um aumento progressivo da temperatura e uma diminuição da humidade a partir dos meses de julho, comportamento típico das condições climáticas da cidade de Brasília/DF. Observa-se ainda a ausência de dados em determinados períodos de monitorização. Verifica-se que, para a escola CEPI, os valores mínimo, médio e máximo de temperatura são numericamente superiores, enquanto os correspondentes valores de humidade são inferiores. Ademais, identifica-se um pico de temperatura na escola CED no mês de maio, associado ao facto de a porta do ambiente monitorizado ter permanecido aberta durante vários dias.

Atualmente, os dados coletados são integrados aos modelos BIM por meio de procedimentos manuais, mediante a edição de parâmetros compartilhados (Shared Parameters) no ambiente do Autodesk Revit. Especificamente, são atualizados os parâmetros FM_Temp_Max_Dia, FM_Temp_Min_Dia, FM_Temp_Media_Dia, FM_Humi_Max_Dia, FM_Humi_Min_Dia e FM_Humi_Media_Dia, associados à família “Monitor de Dados Ambientais”, desenvolvida para representar pontos de monitorização nos ambientes analisados. Atualmente, estes parâmetros não estão ainda mapeados diretamente para propriedades específicas do modelo IFC, sendo esta interoperabilidade considerada como etapa futura do desenvolvimento.

Paralelamente, está em desenvolvimento uma API em linguagem C#, a ser implementada no Revit. A API estabelecerá a ligação entre a base de dados no servidor Hetzner e o modelo BIM no Autodesk Revit, iniciando com a consulta e extração dos dados ambientais. Em seguida, realiza o tratamento e agregação dos valores (máximos, mínimos e médias) em diferentes escalas temporais. Posteriormente, identifica o elemento paramétrico correspondente no modelo, com base em identificadores como MAC Address ou código do espaço por meio da classe FilteredElementCollector oriunda da biblioteca Revit API.dll, e executa o mapeamento dos dados para os parâmetros FM. Por fim, atualiza automaticamente os parâmetros no modelo BIM e regista a operação para efeitos de validação e rastreabilidade.

5. Conclusões

Este estudo analisou uma proposta de integração do BIM-FM com sistemas de monitorização ambiental baseados em sensores *IoT*, aplicada a edifícios públicos em fase de operação, nomeadamente duas escolas e um edifício institucional no Distrito Federal, Brasil. A

investigação demonstrou o potencial desta abordagem como suporte à gestão de ativos, ao conforto térmico e à sustentabilidade operacional.

O principal contributo do trabalho consiste na implementação de uma arquitetura de monitorização ambiental de baixo custo, capaz de recolher e visualizar dados contínuos de temperatura e humidade, e no seu enquadramento no contexto do BIM-FM. Os resultados permitiram caracterizar o comportamento termo higrométrico dos edifícios, identificar variações sazonais e situações pontuais anómalas, evidenciando o valor destes dados para apoiar decisões de operação e manutenção.

Considerando a intervenção efetuada na Escola CEPI, a adoção daquela medida ilustra o potencial da monitorização ambiental contínua como ferramenta de apoio à tomada de decisão em operação e manutenção, permitindo a identificação de problemas reais e a implementação de ações práticas baseadas em dados objetivos.

Os resultados obtidos sinalizam para futuro potencial da integração entre BIM-FM e monitorização ambiental como ferramenta de apoio à gestão inteligente de edifícios públicos. A incorporação de dados dinâmicos provenientes de sensores enriquece os modelos BIM tradicionalmente estáticos, aproximando-os de uma lógica de gestão baseada no desempenho real dos edifícios e contribuindo para estratégias mais proativas de O&M.

Entre as principais limitações destacam-se o número reduzido de edifícios e pontos de monitorização, a análise restrita a dois parâmetros ambientais (temperatura e humidade) e a integração ainda limitada com sistemas comerciais de *Facility Management*. Adicionalmente, ocorreram interrupções pontuais na recolha de dados associadas a ajustes técnicos dos equipamentos.

Como desenvolvimentos futuros, propõe-se a expansão do sistema com a inclusão de mais sensores e novos parâmetros ambientais, a integração com plataformas comerciais de FM, a implementação de mecanismos de automação de ações baseadas nos dados monitorizados e a aplicação da abordagem a outros tipos de edifícios, de modo a avaliar a sua escalabilidade e generalização.

Ademais, está em desenvolvimento uma aplicação destinada à atualização periódica, no modelo BIM, dos dados coletados pelos sensores. Simultaneamente, desenvolve-se uma segunda aplicação com a finalidade de viabilizar a visualização, em tempo real, do modelo BIM atualizado.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Defensoria Pública do Distrito Federal (DPDF) e à Secretaria de Estado de Educação do Distrito Federal (SEDF) pela colaboração e apoio prestados no desenvolvimento deste estudo. Este trabalho foi apoiado pela FCT/MCTES através de fundos nacionais no âmbito da Unidade de I&D Centro de Território, Ambiente e Construção (CTAC), com a referência UID/4047/2025 (<https://doi.org/10.54499/UID/04047/2025>).

Referências

- [1] M. M. F. de Oliveira, A. F. Tavares, and M. A. Mortoni Silva, “Análise do ciclo de vida (LCA) aplicada à estrutura sustentável em projeto residencial,” in *61º Congresso Brasileiro do Concreto - CBC2019*, 2019, pp. 1–16.
- [2] Y. Hu, L. Xiang, and K. Shang, “The Research Review on Life Cycle Carbon Emissions in the Operational Process of Modular Buildings,” *Buildings*, vol. 15, no. 12, p. 2085, 2025, doi: <https://www.mdpi.com/2075-5309/15/12/2085>.
- [3] A. S. Borkowski, “A Literature Review of BIM Definitions: Narrow and Broad Views,” *Technologies*, vol. 11, no. 6, 2023, doi: 10.3390/technologies11060176.
- [4] A. Teixeira and S. Scheer, “BIM-FM como suporte à gestão de espaços de edificações públicas: uma aplicação de verificação automática de regras,” *Gestão Tecnol. Proj.*, vol. 19, no. 2, pp. 79–104, 2024, doi: <https://doi.org/10.11606/gtp.v19i2.20224>.
- [5] ISO - International Standards Organization, “Facility management - Vocabulary,” vol. 2024. ISO, p. 4, 2024.
- [6] M. T. Desbalo *et al.*, “Critical factors that influence the effectiveness of facility maintenance management practice in public university buildings in Ethiopia: an exploratory factor analysis,” *Cogent Eng.*, vol. 11, no. 1, p. , 2024, doi: 10.1080/23311916.2024.2307150.
- [7] L. J. Lovell, R. J. Davies, and D. V. L. Hunt, “Building Information Modelling Facility Management (BIM-FM),” *Appl. Sci.*, vol. 14, no. 10, 2024, doi: 10.3390/app14103977.
- [8] N. A. A. Ismail *et al.*, “A Systematic Literature Review on BIM-based Facilities Management towards Sustainable Construction,” *Chem. Eng. Trans.*, vol. 106, pp. 385–390, 2023, doi: 10.3303/CET23106065.
- [9] W. K. Yieu *et al.*, “Adoption of Building Information Modeling (BIM) in Facilities Management (FM) Practices in Malaysia,” *Int. J. Res. Innov. Soc. Sci.*, vol. 8, no. 14, p. 6, 2025, doi: <https://dx.doi.org/10.47772/IJRISS.2024.814MG0047>.
- [10] P. Gordo-Gregorio, H. Alavi, and N. Forcada, “Decoding BIM Challenges in Facility Management Areas: A Stakeholders’ Perspective,” *Buildings*, vol. 15, no. 5, pp. 1–23, 2025, doi: 10.3390/buildings15050811.
- [11] L. Pinti, R. Codinhoto, and S. Bonelli, “A Review of Building Information Modelling (BIM) for Facility Management (FM): Implementation in Public Organisations,” *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 3, 2022, doi: 10.3390/app12031540.
- [12] H. Jain, “Critical insights into thermal comfort optimization and heat resilience in indoor spaces,” *City Built Environ.*, vol. 2, no. 1, 2024, doi: 10.1007/s44213-024-00038-z.
- [13] Y. Zhu, S. Guo, and W. Liang, “A literature review investigating the impact of temperature and humidity on volatile organic compound emissions from building materials,” *Build. Environ.*, vol. 262, no. June, p. 111845, 2024, doi: 10.1016/j.buildenv.2024.111845.
- [14] T. Rus, *et al.*, “Data-driven environments: Evaluating IoT sensors and KNX protocol for monitoring indoor conditions in educational facilities,” *Front. Built Environ.*, vol. 11, no. November, 2025, doi: 10.3389/fbuil.2025.1688582.
- [15] M. P. Botana Martinez *et al.*, “Rethinking heat in thousands of school classrooms through continuous monitoring and novel exposure metrics,” *Indoor Environ.*, vol. 2, no. 3, pp. 100–105, 2025, doi: 10.1016/j.indenv.2025.100105.