

# Inteligência artificial aplicada à gestão do ambiente construído: Revisão de literatura

<https://doi.org/10.21814/uminho.ed.32.48>

Rodrigo Pedral Sampaio<sup>1,2</sup>, António Aguiar Costa<sup>2,3</sup>,  
Inês Flores-Colen<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais, 1 1049-001, Lisboa, Portugal

<sup>2</sup> CERIS, Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais, 1 1049-001, Lisboa, Portugal

<sup>3</sup> BUILT CoLAB – Collaborative Laboratory for the Future Built Environment, Portugal

## Resumo

Durante a fase de Operação e Manutenção (O&M), as equipas de *Facility Management* (FM), gastam tempo recolhendo e processando dados de diversas origens, que muitas vezes não são devidamente considerados na tomada de decisões futuras. O *Building Information Modeling* (BIM) permite alavancar a forma como os dados e a informação são sistematizados, possibilitando a organização estruturada dessa informação e a sua utilização e tratamento otimizando os processos e a gestão do ambiente construído. Os modelos estatísticos mais elaborados, baseados em inteligência artificial (AI), são uma ferramenta para apoio ao FM e à tomada de decisão. Este artigo aborda o estado da arte sobre a utilização de técnicas de AI aplicados ao FM no contexto BIM, tendo sido analisados artigos do *Scopus* entre 2010 e 2020, relacionados com esta área. É interessante verificar que apenas a partir de 2018 é que se observa um aumento substancial do número dessas publicações, de cerca de 6 publicações (2010 a 2017) para 22 publicações (2018 a 2020) em média, anualmente. Este aumento resulta da crescente aplicação destes novos métodos de análise e otimização supracitados, que abrem novas oportunidades para abordar este problema de forma diferente sendo essencial para a função do *Facility Manager*.

## 1. Introdução

*Facility Management* (FM) ou gestão do ambiente construído é uma atividade que integra a gestão de pessoas, espaços, processos e tecnologia no âmbito do ambiente construído, no qual, o principal objetivo é o de garantir a sua adequada e otimizada funcionalidade. É conhecido que cerca de 85% do custo total do ciclo de vida dos empreendimentos são gastos nessas atividades num prazo médio em torno de 50 anos [1]. Também, ao longo do ciclo de vida de um edifício, a maior fração das despesas são incorridas durante a fase de Operação e Manutenção (O&M) e representam 50-70% dos custos operacionais anuais totais [2]. Nesse sentido, considerando estes custos significativos a ocorrer na fase operacional, surge uma necessidade cada vez maior de desenvolver práticas mais eficientes voltadas para a gestão do ambiente construído.

É importante assinalar que, neste contexto, a gestão e a integração dos processos e produtos ainda são realizados manualmente, o que o torna ainda mais complexo[3]. Durante a fase de manutenção e operação as equipas de FM gastam tempo recolhendo e processando dados de diversas origens, que muitas vezes não são devidamente considerados em decisões futuras. Acresce a isso a inacessibilidade de um histórico de dados, razão pela qual, os erros e ineficiências não são usados para uma melhoria contínua numa escala mais ampla dentro da indústria da construção [4]. Por este motivo, as atividades de operação e manutenção nem sempre são eficientes, o que resulta num vasto campo de pesquisas e melhorias.

Nesse contexto, a tecnologia e a gestão da informação têm se tornado peças fundamentais no processo de tomada de decisão e com isso desempenhado um papel cada vez mais importante no FM. Assim, o seu potencial para melhorar a produtividade e a eficiência é amplamente reconhecido [5]–[7]. Em particular, o *Building Information Modeling* (BIM) permite alavancar a forma como os dados e a informação são sistematizados, possibilitando a organização estruturada dessa informação e a sua utilização e tratamento, otimizando os processos e a gestão do ambiente construído, gerando valor, quer para os proprietários quer para as organizações que fazem a gestão desses ativos [8].

Entretanto, quando os dados no BIM aumentam para um determinado volume, métodos analíticos mais sofisticados são requisitados [9]. Essa ciência de dados, nomeadamente os modelos baseados em inteligência artificial (AI), que imitam a notável habilidade da mente humana de raciocinar e aprender em circunstâncias de incerteza e imprecisão são uma ferramenta para apoio a gestão desses dados, minimizando riscos e encontrando novas soluções, ampliando dessa forma a precisão no processo da tomada de decisão. Consequentemente, este método pode lidar com problemas complexos, que não podem ser descritos por modelos analíticos e exatos, como por exemplo os modelos físicos[10].

Assim, os *Facility Managers*, podem contar com os longos anos de experiência e acúmulo de informações para criar dados de partida para algoritmos de aprendizagens,

conciliar os reais componentes ao seu corresponde modelo 3D e ainda, aproveitar toda essa inteligência inserida ao sistema, para executar os planos de ação [11].

Este artigo aborda assim, o estado da arte sobre a utilização de técnicas de AI aplicadas ao FM no contexto BIM, tendo sido analisados artigos do *Scopus* entre 2010 e 2020, respeitantes a esta área e, além desse capítulo de introdução (1), o artigo está dividido da seguinte forma: originalidade da investigação (2); metodologia de investigação (3); análise bibliométrica dos resultados e discussão (4); conclusão e trabalhos futuros (5).

## 2. Originalidade da Investigação

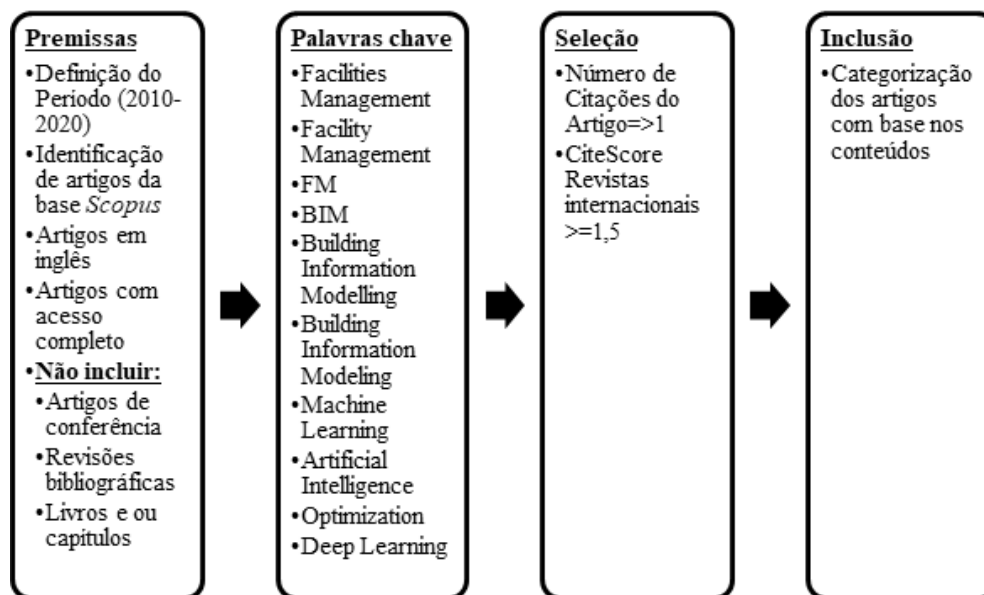
Entre 2010 e 2020 poucas revisões de literatura envolvendo BIM e FM foram publicadas. Volk *et al* [12], abordam a da implementação do BIM aplicada ao FM em edifícios existentes e revelaram uma carência na área de otimização e automatização de processos e ferramentas. Para Ilter, D. e Ergen, E. [13] um dos desafios para o futuro envolve o desenvolvimento de sistemas mais eficientes, através da identificação de ativos e da captura de dados usando tecnologias como, códigos de barras e identificador de radiofrequência (RFID). Santos *et al* [6], numa revisão de literatura pormenorizada, acreditam que o desenvolvimento de novas ferramentas, baseadas em modelos BIM, aplicadas ao FM tem grande potencial de crescimento. De igual maneira, Wong *et al* [14], recomendam estudos futuros com a utilização de técnica de inteligência artificial para melhorar a capacidade de reconhecer objetos em diferentes ambientes ou condições internas.

Nesse sentido, dado o elevado número de publicações, sobretudo nos últimos 3 anos, aliado aos desafios a serem ultrapassados já identificados e os que ainda estão por identificar, é necessário analisar qual o atual estado de conhecimento sobre a utilização de técnicas de inteligência artificial aplicada ao FM.

## 3. Metodologia de Investigação

Este estudo analisa e categoriza as pesquisas existentes sobre a utilização de técnicas de AI aplicadas ao FM no contexto BIM durante a última década e até 2020 através da realização de um método quantitativo e qualitativo. A análise bibliométrica neste estudo visa fornecer uma análise quantitativa por meio de métodos estatísticos para analisar tendências de publicação e citação académica para avaliar o desempenho da pesquisa existente e compreender os padrões. A análise bibliométrica neste estudo consiste em seis etapas (Figura 1): (i) busca por palavras chaves na base de dados *Scopus*; (ii) seleção das revistas internacionais com o *citescore* (*citescore*: “é o número de citações recebidas por um artigo em um ano de documentos publicados nos três anos anteriores, dividido pelo número de documentos indexados no *Scopus* publicados nesses mesmos três anos”) maior ou igual a 1.5; (iii) seleção de artigos citados pelo menos uma vez; (iv) aplicação de filtros apenas para incluir artigos

relacionados a utilização de técnicas de AI aplicadas ao FM no contexto BIM; e (v) categorização dos artigos com base nos conteúdos.



**Figura 1**

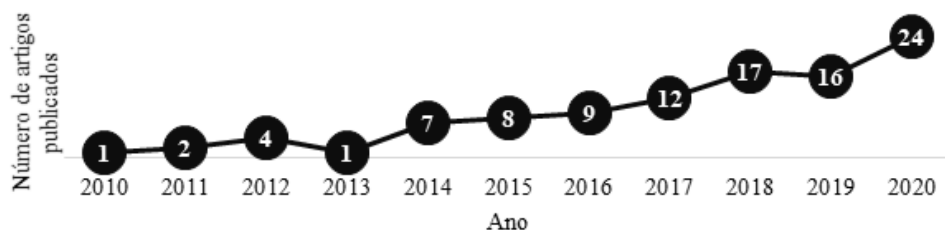
Diagrama de fluxo para seleção dos artigos.

Na primeira etapa da análise bibliométrica, realizou-se uma procura por palavras-chave na base de dados *Scopus* usando as palavras-chave: “*Facility management*”; “*Facilities management*”; “*FM*”; (4) “*BIM*”; “*Building Information Modelling*”; “*Building Information Modeling*”; “*Artificial Intelligence*”; “*Machine Learning (ML)*”; “*Optimization*”; “*Deep Learnig*” o que resultou em 132 documentos no qual o tema havia correlações com as de técnicas de AI e ML aplicadas ao FM no contexto BIM. O passo seguinte foi fazer um filtro nos artigos que não tiveram: (i) num período de pelo menos 3 anos 1 citação, (ii) que a revista internacional em que o artigo foi publicado tinha um *citescore* inferior ou igual a 1,5, (iii) que não tinha acesso aberto ao artigo completo, ou ainda, (iv) que após leitura completa do artigo o conteúdo desviava-se da temática principal, o que resultou finalmente num inventário com 101 documentos.

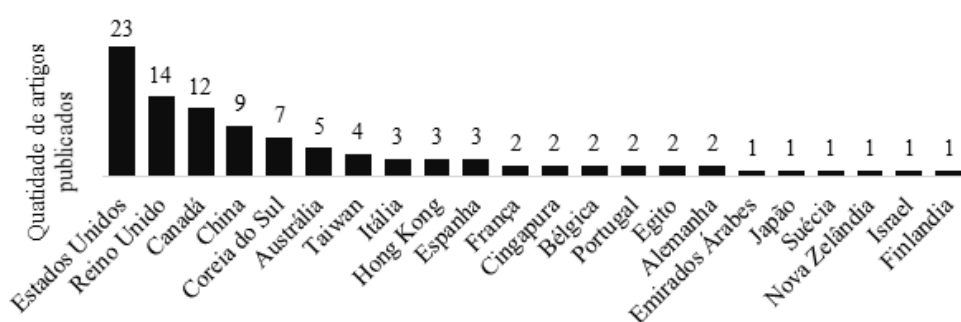
#### 4. Análise bibliométrica dos resultados

A análise bibliométrica mostra que na última década houve um aumento de artigos publicados sobre a utilização de técnicas de AI aplicados ao FM de 1 (um) artigo em 2010 para 24 (vinte e quatro) artigos em 2020 (Figura 2). Também é interessante notar que 77,2% dos 101 artigos analisados foram publicados até entre 2016 e 2020, o que demonstra que os últimos cinco anos foram particularmente produtivos nessa temática. Este aumento resulta da crescente aplicação destes novos métodos de análise e otimização supracitados e, que, abrem novas oportunidades para abordar este problema de forma diferente, melhorando a qualidade das informações coletadas e também, do amadurecimento do BIM. A aplicação de ferramentas de AI permite

a otimização na gestão do ambiente construído, sendo essencial para a função do *Facility Manager*.



**Figura 2**  
Número de artigos publicados por ano (2010-2020).



**Figura 3**  
Número de artigos publicados na última década distribuída por países.

Nesse período os Estados Unidos lideraram o número de publicações (23), seguido do Reino Unido (14) e o Canadá (12), sendo, portanto, notório a influência desses países no tema em questão. Regista-se ainda que, Portugal aparece apenas com duas contribuições nesse mesmo período (Figura 3), o que denota um estado ainda incipiente no processo de utilização desses novos métodos mais inteligentes.

Durante o período em análise, e de acordo com os critérios de seleção, o *Automation and Construction Journal* publicou a maioria dos artigos na área (33), seguido pelo *Facilities* (7) e o *Computing in Civil Engineering and Advanced Engineering Informatics* (5) (Tabela 1).

**Tabela 1**

Artigos publicados na última década sobre AI aplicados ao FM no contexto BIM (Lista de revistas internacionais).

Revistas Internacionais	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Total
Automation in Construction	0	0	3	0	1	3	1	3	6	6	10	33
Facilities	0	0	0	0	0	0	1	2	1	3	0	7
Journal of Computing in Civil Engineering	0	1	0	0	0	0	2	2	0	0	0	5
Advanced Engineering Informatics	0	1	0	0	0	1	1	0	2	0	0	5
Buildings	0	0	0	0	0	2	0	0	0	1	1	4
Engineering, Construction and Architectural Management	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	4
Journal of Performance of Constructed Facilities	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	3
Visualization in Engineering	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	3
Applied Sciences	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	3
Construction Innovation	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	2
Advances in Engineering Software	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2
Journal of Building Engineering	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2
Computers in Industry	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	2
Journal of Construction Engineering and Management	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2
Building Research and Information	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2
Energy and Buildings	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	2
Building and Environment	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	2
Journal of Management in Engineering	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2
Proceedings of the IEEE	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
Applied Energy	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
Engineering Failure Analysis	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Lecture Notes in Computer Science	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
Graphical Models	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
Sustainable Cities and Society	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
Journal of Construction Engineering and Management	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
KSCIE Journal of Civil Engineering	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
International Journal of Automation and Computing	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
Journal of Information Technology in Construction	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Tunnelling and Underground Space Technology	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Electronics	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
International Journal of Geographical Information Science	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Journal of Architectural Engineering	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
International Journal of Building Pathology and Adaptation	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
<b>Total</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>12</b>	<b>17</b>	<b>16</b>	<b>24</b>	<b>101</b>

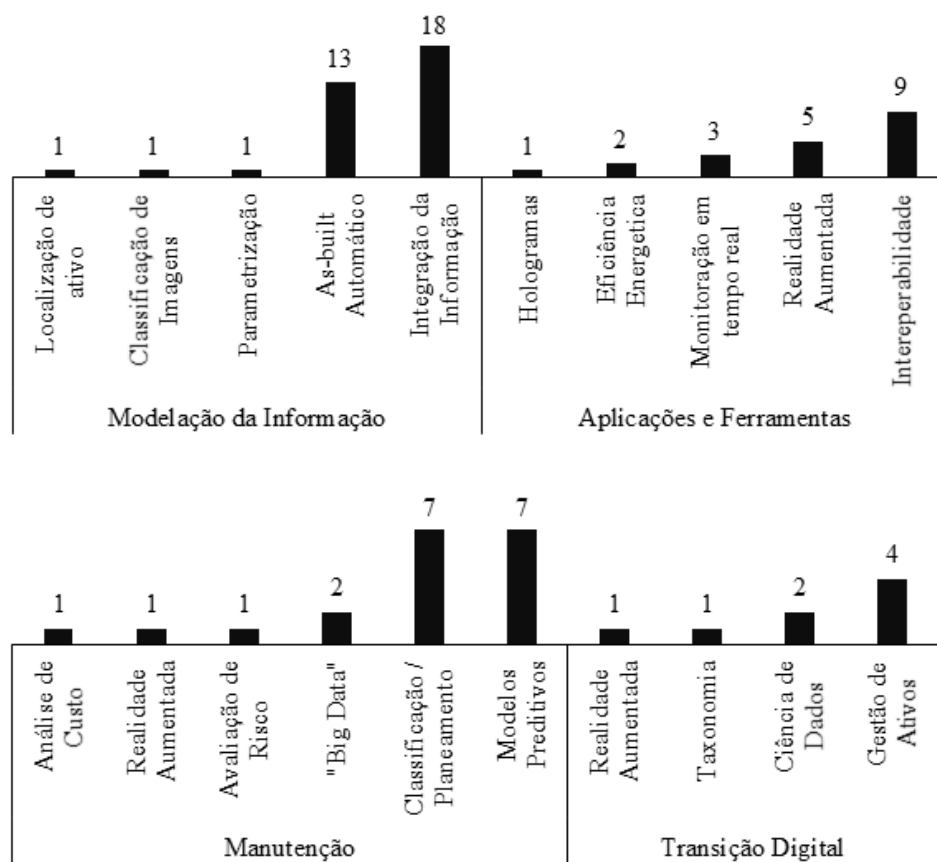
Fundamentado na análise dos resultados, os temas que envolve a inteligência artificial aplicada à gestão do ambiente construído foram divididos em 5 pilares que sustentam todo o processo de gestão dos edifícios e que são melhores descritas na seção 5: (i) modelação da informação, (ii) aplicações e ferramentas (iii) manutenção, (iv) monitorização/inspeção, (v) transição digital,

#### 4. Análise do conteúdo

Para identificar e fornecer uma análise mais aprofundada dos artigos identificados, os autores propuseram uma estrutura de categorização e subcategorização, que foi definida a partir da análise de vários domínios, com base no conteúdo de pesquisa. As Figuras 4 a 6 apresentam as divisões das subcategorias de cada um dos pilares apresentados.

A introdução da transição digital dentro da indústria do FM tem ocupado um papel cada vez mais importante. Esse tema foi encontrado em cerca de 8% dos artigos analisados, o menor número entre os pilares proposto, e as tendências apontam para a construção de edifícios com sensores sofisticados e sistemas informatizados inteligentes capazes de fornecer dados sobre o estado e desempenho de seus elementos em tempo real. Entretanto, ainda se constata um baixo nível de maturidade tecnológica das empresas do setor de FM, sinalizando uma lenta adoção dessas novas ferramentas e tecnologia de apoio à gestão da O&M. A informação de construção incompleta na entrega e a falta de ferramentas dedicadas à gestão de O&M são

motivos importantes para explicar o atraso no desenvolvimento de uma gestão do setor, de uma forma mais inteligente.



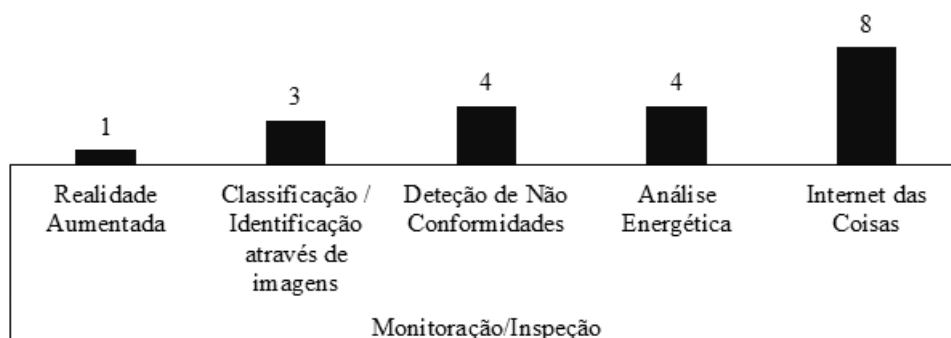
**Figura 4**  
Subcategorias  
Modelação da  
Informação e Aplicações  
e Ferramentas.

**Figura 5**  
Subcategorias  
Manutenção e Transição  
Digital.

Por outro lado, a modelação da informação foi a categoria que apresentou o maior número de publicações com cerca de 34% dos artigos analisados. As subcategorias mais citadas dentro dessa categoria foram referentes à utilização de inteligência artificial para realização de *as-built* automáticos e para integrar informações. Modelos e desenhos *as-built* são documentos essenciais usados durante a O&M de edifícios para a gestão de espaços de instalações, equipamentos e sistemas de energia. Portanto, ter um modelo de informação conforme construído é fundamental para iniciar um processo de gestão e análise em um edifício. Entretanto, a preparação para o BIM no estado em que se encontra geralmente é um processo demorado, trabalhoso e caro. Na revisão realizada nota-se que soluções inteligentes e algoritmos de identificação estão sendo cada vez mais investigadas para melhorar a captura e a comunicação de informações essenciais para as O&M [15]–[17].

Monitoração e inspeção de ativos e desenvolvimento de aplicações e ferramentas aparecem com cerca 20% e 21% dos artigos analisados respetivamente, assumem também um papel fundamental na gestão da O&M, uma vez que são responsáveis por alimentar com informações o modelo, no decorrer da vida do ativo e desenvolver ferramentas que possam cada vez mais facilitar a gestão desses ativos. Os *facility*

*manager* necessariamente, precisam identificar padrões de causa e efeito de falha para preparar planos de manutenção. Esta tarefa é difícil por causa da interação complexa e interdependências entre os diferentes componentes do edifício e por isso o compartilhamento e a troca de informações entre diferentes aplicativos ao longo do ciclo de vida das instalações tornam-se cada vez mais necessários. Adicionalmente, as informações sobre as condições das instalações podem ser obtidos através da Internet das Coisas (IoT), como redes de sensores ou RFID [18]–[20].



**Figura 6**  
Subcategorias  
Monitoração e Inspeção.

Embora vários tipos de *software* existam no mercado para arquitetos e construtores para construir modelos BIM, a sua interoperabilidade é limitada. Por sua vez, diversas interfaces de programação de aplicação, que aparecem em 20% dos artigos analisados, estão sendo desenvolvidos atualmente com questões emergentes de interoperabilidade entre fontes de dados distintas. No entanto, a literatura existente sobre integração BIM-FM também aponta para as limitações específicas da integração de dados entre BIM e sistemas de FM, bem como a falta de metodologia padronizada para tal transferência de dados e com isso cresce cada vez mais a necessidade de criar ferramentas personalizadas [21], [22].

A manutenção é um tema fundamental para garantir a funcionalidade e a correta operação do edifício. Não obstante, a maioria dos sistemas existentes atuais não podem fornecer programação automática de um grande número de ordens de serviço de manutenção e, portanto, a revisão de literatura realizada aponta para a utilização de vários algoritmos de aprendizagem, incluindo redes neurais artificiais (ANN), SVM e cadeias de Markov, aplicados para prever a condição de cada um dos ativos que compõe o empreendimento. O conceito de AI surge como uma alternativa que pode ser utilizada em problemas estatísticos em que não existe uma expressão pré-definida relacionando as entradas com as saídas de forma que a operação de encaixe ajuste simultaneamente a relação entre as entradas e as saídas e o peso relativo de cada entrada[23].

## 5. Considerações finais

Esse artigo fornece uma visão geral da aplicação das técnicas de AI ao FM no contexto BIM. Ao todo foram estudados 101 artigos, publicados entre 2010 e 2020 e



foram devidamente classificados e analisados. Devido a limitação de espaço os temas foram abordados de forma global e transversal de forma a cobrir todos os assuntos atualmente investigados.

As tendências tecnológicas globais apontam para um compromisso dos responsáveis do setor de FM, na utilização de novas ferramentas tecnológicas, na adoção de novos processos e procedimentos e um claro foco na gestão eficiente, durante o ciclo de vida da construção e parece que esta indústria vive no momento, um explosivo crescimento devido à integração de novas tecnologias, conceitos e abordagens e, com ela, a necessidade de empresas e organizações aumentarem sua capacidade de adotar a tomada de decisão automatizada baseada em dados.

Os *facility managers* possuem grandes quantidades de dados que requerem tempo e muitos recursos. Além disso, a chave para programar quando as intervenções serão necessárias depende da capacidade de prever a condição futura do ativo e, na maioria dos casos, as inter-relações entre os vários componentes e sistemas de construção, a multiplicidade de componentes de construção e vários fatores ambientais variáveis são negligenciados. O desenvolvimento de novos métodos estatísticos, nomeadamente aqueles normalmente classificados como ferramentas de AI, abre novas oportunidades para abordar este problema de forma diferente e tem tentado ultrapassar as dificuldades acima mencionadas.

Em suma, AI está desencadeando desenvolvimentos em muitos campos, como ML, solução de problemas e planeamento, *as-built* automáticos, entre muitos outros. Assim, a AI pode ser usada para conectar dados de forma inteligente, onde a capacidade dos humanos de processar essas informações costuma ser limitada.

## Referências

- [1] E. Teicholz, "Bridging the AEC technology gap", *IFMA Facility Management Journal*, 2004.
- [2] E.P. Rondeau, R. K. Brown, and P. D. Lapidés, *Facility Management*, 2nd ed. John Wiley & Sons, 2012.
- [3] A. K. Jallow, P. Demian, A. N. Baldwin, and C. Anumba, "An empirical study of the complexity of requirements management in construction projects", *Engineering, Construction and Architectural Management*, vol. 21, no. 5, pp. 505-531, Sep. 2014, doi: 10.1108/ECAM-09-2013-0084.
- [4] R. Lundkvist, J. H. Meiling, and M. Sandberg, "A proactive plan-do-check-act approach to defect management based on a Swedish construction project", *Construction Management and Economics*, vol. 32, no. 11, pp. 1051-1065, Nov. 2014, doi: 10.1080/01446193.2014.966733.
- [5] R. Vieira, P. Carreira, P. Domingues, and A. A. Costa, "Supporting building automation systems in BIM/IFC: reviewing the existing information gap", *Engineering*,

- Construction and Architectural Management*, vol. 27, no. 6. Emerald Group Holdings Ltd., pp. 1357-1375, Jun. 22, 2020. doi: 10.1108/ECAM-07-2018-0294.
- [6] R. Santos, A. A. Costa, and A. Grilo, "Bibliometric analysis and review of Building Information Modelling literature published between 2005 and 2015", *Automation in Construction*, vol. 80. Elsevier B.V., pp. 118-136, Aug. 01, 2017. doi: 10.1016/j.autcon.2017.03.005.
  - [7] A. A. Costa, P. M. Lopes, A. Antunes, I. Cabral, A. Grilo, and F. M. Rodrigues, "3I Buildings: Intelligent, Interactive and Immersive Buildings", in *Procedia Engineering*, 2015, vol. 123, pp. 7-14. doi: 10.1016/j.proeng.2015.10.051.
  - [8] B. Becerik-Gerber, F. Jazizadeh, N. Li, and G. Calis, "Application Areas and Data Requirements for BIM-Enabled Facilities Management", *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 138, no. 3, pp. 431-442, Mar. 2012, doi: 10.1061/(asce)co.1943-7862.0000433.
  - [9] Y. Peng, J. R. Lin, J. P. Zhang, and Z. Z. Hu, "A hybrid data mining approach on BIM-based building operation and maintenance", *Building and Environment*, vol. 126, pp. 483-495, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.buildenv.2017.09.030.
  - [10] E. v. Ana and W. Bauwens, "Modeling the structural deterioration of urban drainage pipes: The state-of-the-art in statistical methods", *Urban Water Journal*, vol. 7, no. 1, pp. 47-59, Feb. 2010, doi: 10.1080/15730620903447597.
  - [11] T. Bloch and R. Sacks, "Comparing machine learning and rule-based inferencing for semantic enrichment of BIM models," *Automation in Construction*, vol. 91, pp. 256–272, Jul. 2018, doi: 10.1016/j.autcon.2018.03.018.
  - [12] R. Volk, J. Stengel, and F. Schultmann, "Building Information Modeling (BIM) for existing buildings – Literature review and future needs", *Automation in Construction*, vol. 38. pp. 109-127, Mar. 2014. doi: 10.1016/j.autcon.2013.10.023.
  - [13] D. Ilter and E. Ergen, "BIM for building refurbishment and maintenance: current status and research directions", *Structural Survey*, vol. 33, no. 3. Emerald Group Publishing Ltd., pp. 228-256, Jul. 13, 2015. doi: 10.1108/SS-02-2015-0008.
  - [14] J. K. W. Wong, J. Ge, and S. X. He, "Digitisation in facilities management: A literature review and future research directions", *Automation in Construction*, vol. 92. Elsevier B.V., pp. 312-326, Aug. 01, 2018. doi: 10.1016/j.autcon.2018.04.006.
  - [15] C. Wang, Y. K. Cho, and C. Kim, "Automatic BIM component extraction from point clouds of existing buildings for sustainability applications", *Automation in Construction*, vol. 56, pp. 1-13, Aug. 2015, doi: 10.1016/j.autcon.2015.04.001.
  - [16] A. Bhatla, S. Y. Choe, O. Fierro, and F. Leite, "Evaluation of accuracy of as-built 3D modeling from photos taken by handheld digital cameras", *Automation in Construction*, vol. 28, pp. 116-127, Dec. 2012, doi: 10.1016/j.autcon.2012.06.003.

- [17] L. Klein, N. Li, and B. Becerik-Gerber, "Imaged-based verification of as-built documentation of operational buildings", *Automation in Construction*, vol. 21, no. 1, pp. 161-171, Jan. 2012, doi: 10.1016/j.autcon.2011.05.023.
- [18] J. C. P. Cheng, W. Chen, K. Chen, and Q. Wang, "Data-driven predictive maintenance planning framework for MEP components based on BIM and IoT using machine learning algorithms", *Automation in Construction*, vol. 112, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.autcon.2020.103087.
- [19] M. Marzouk and A. Abdelaty, "Monitoring thermal comfort in subways using building information modeling", *Energy and Buildings*, vol. 84, pp. 252-257, 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.08.006.
- [20] A. Motamedi, A. Hammad, and Y. Asen, "Knowledge-assisted BIM-based visual analytics for failure root cause detection in facilities management", *Automation in Construction*, vol. 43, pp. 73-83, 2014, doi: 10.1016/j.autcon.2014.03.012.
- [21] E. A. Pärn and D. J. Edwards, "Conceptualising the FinDD API plug-in: A study of BIM-FM integration", *Automation in Construction*, vol. 80, pp. 11-21, Aug. 2017, doi: 10.1016/j.autcon.2017.03.015.
- [22] T. W. Kang and C. H. Hong, "A study on software architecture for effective BIM/GIS-based facility management data integration", *Automation in Construction*, vol. 54, pp. 25-38, 2015, doi: 10.1016/j.autcon.2015.03.019.
- [23] V. Sousa, J. P. Matos, and N. Matias, "Evaluation of artificial intelligence tool performance and uncertainty for predicting sewer structural condition", *Automation in Construction*, vol. 44, pp. 84-91, 2014, doi: 10.1016/j.autcon.2014.04.004.