

Digital Twin e a necessidade de uma framework integradora para a gestão do ambiente construído

<https://doi.org/10.21814/uminho.ed.142.33>

Rodrigo Pedral Sampaio¹,
António Aguiar Costa¹, Inês Flores-Colen¹

¹ Civil Engineering Research and Innovation for Sustainability (CERIS),
DECivil, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa,
Av. Rovisco Pais, 1 1049-001, Lisboa, Portugal

Resumo

A tecnologia de *Digital Twin* (DT) tem vindo a ganhar popularidade no setor do ambiente construído devido aos seus usos potenciais. Este artigo explora a aplicação do conceito de DT para impulsionar uma Era de eficiência no *Facility Management* (FM), com ênfase em uma estrutura conceitual para sua implementação. Várias perguntas surgem quando criamos um DT aplicado ao FM, nomeadamente: Como devemos estruturar o modelo de DT? Que informações devemos ser capazes de visualizar? Como o modelo de DT deve interagir com o usuário? Estas são algumas das perguntas para as quais ainda precisamos de uma resposta consistente. Foi utilizada uma abordagem de métodos mistos que combinou uma revisão da literatura com estudos de caso detalhados para entender melhor o estado atual das aplicações de DT no setor do ambiente construído. Este estudo apresenta uma estrutura conceitual pormenorizada para o uso estratégico do DT aplicada ao ambiente construído. A *framework* aborda os principais componentes do processo, desde a aquisição de dados do mundo real por meio de sensores e tecnologias de Internet das Coisas (IoT), até à construção e atualização contínua do modelo virtual correspondente. O estudo encontrou lacunas substanciais na integração dos diferentes componentes dos gémeos digitais, resultando em ineficiências e subutilização. A pesquisa também revelou que a necessidade de mais padronização em estruturas de gémeos digitais é um desafio significativo. Este estudo enfatiza a importância de usar uma abordagem integrada para desenvolver a tecnologia de gémeos digitais para realizar o seu pleno potencial na indústria do ambiente construído.

1. Introdução

O desafio de gerir o ambiente construído é atualmente particularmente complexo, considerando os crescentes requisitos de desempenho não apenas em termos de energia e meio ambiente, mas também do ponto de vista humano. Por um lado, há uma clara necessidade de investir em metas de desempenho e carbono. Por outro lado, é possível adotar uma abordagem sustentável para o ambiente construído apenas em uma sociedade saudável.

A complexidade e as capacidades de manter, melhorar e adaptar edifícios em condições de uso também obrigam os profissionais que atuam na gestão do edificado construído, a equiparem-se com ferramentas tecnológicas especializadas para automatizar tarefas rotineiras, gerir informação, monitorar o desempenho do edifício e apoiar os processos de tomada de decisão.

Consoante a inúmeros estudos [1], [2], o *Digital Twin* – ou em sua tradução literal o gêmeo digital (DT), destaca-se como abordagem tecnológica com um potencial de criação de valor, despertando interesse das empresas. Este domínio tem vindo a ganhar visibilidade na comunidade científica, refletida pelo aumento de publicações ao longo dos últimos anos [3].

Num contexto empresarial, a implementação de DT tem revelado impactos substanciais, contribuindo para uma melhoria na eficiência operacional e na tomada de decisões estratégicas [4], [5]. A capacidade de representar fielmente sistemas físicos no ambiente digital proporciona uma visão mais aprofundada e precisa, permitindo às organizações otimizar processos, antecipar desafios e aprimorar a sua agilidade face às rápidas mudanças do mercado. Este enfoque tecnológico continua a ser objeto de investigação intensiva, consolidando-se como um catalisador para a inovação e o avanço nas práticas empresariais.

Para implementar com sucesso um gêmeo digital para o ambiente construído, é crucial estabelecer um quadro abrangente que oriente sua integração. Portanto, este artigo tenta abordar as seguintes questões de pesquisa:

Q1 – Como devemos estruturar o modelo de DT?

Q2 – Que informações deveríamos ser capazes de visualizar?

Q3 – Como o modelo de gêmeo digital deveria interagir com o usuário?

Foi empregue uma abordagem de métodos mistos para compreender o estado das aplicações de gêmeos digitais no setor do ambiente construído. Esta abordagem integrou uma revisão detalhada da literatura e entrevistas com especialistas, explorando o assunto. Ao combinar essas duas metodologias, nosso objetivo era capturar tanto as tendências mais amplas identificadas em pesquisas existentes quanto as percepções práticas derivadas de exemplos específicos do mundo real. Esta abordagem aprimora nossa compreensão, proporcionando uma perspectiva holística sobre as aplicações em evolução de gêmeos digitais no ambiente construído.

O potencial transformador dos gêmeos digitais na gestão do ambiente construído oferece um sólido quadro conceitual para orientar as organizações em direção à adoção eficaz. Isso nos permite melhorar a eficiência e sustentabilidade dos processos, enquanto prepara os profissionais de FM para uma Nova Era de possibilidades.

2. A transformação digital na gestão do ambiente construído

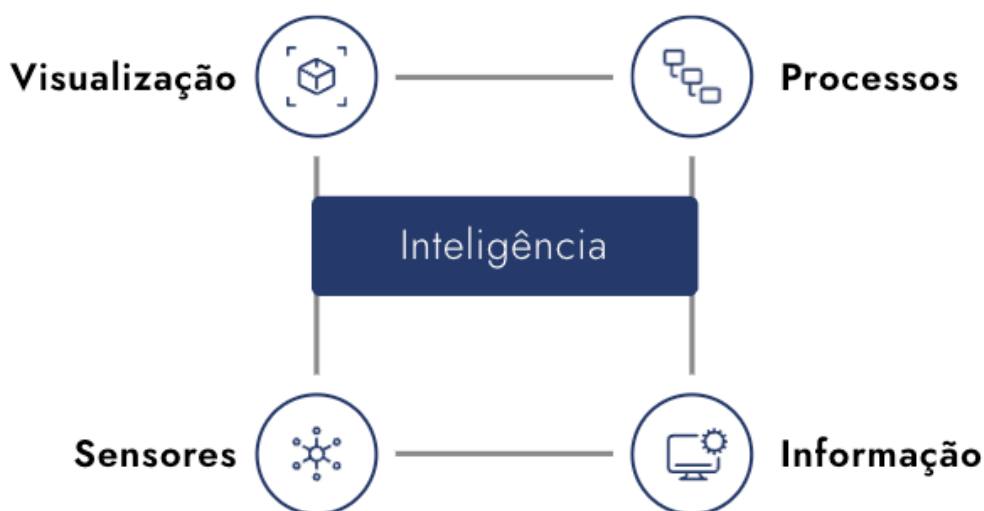
A chamada Indústria 4.0 (a quarta revolução industrial) visa conectar os sistemas de produção com as tecnologias de informação e comunicação (TIC), o que mudará significativamente a estrutura da indústria, os modelos de negócios e as necessidades do consumidor [6]. No setor da construção, essa transformação é chamada de Construção 4.0 [7]. A inclusão de conceitos novos e inovadores, como digitalização, industrialização e automação, tem sido impulsionada principalmente pela revolução digital e pela falta de mão-de-obra qualificada. Essas tendências têm o potencial de melhorar a estruturação e administração do setor industrial, otimizando os aspectos de custo, sustentabilidade ambiental e segurança ao longo da cadeia de valor do ambiente construído, contribuindo para a criação de uma indústria mais resiliente [7]. Além disso, as TIC estão a tornar-se cada vez mais importantes neste setor, fornecendo ferramentas e sistemas para a gestão da informação e a melhorando a produtividade e a eficiência.

O gêmeo digital, representa um dos desenvolvimentos mais promissores para a digitalização para esse setor [8]. O DT refere-se a uma representação virtual e digital de um objeto físico, processo ou sistema. É uma cópia digital em tempo real de um determinado objeto ou sistema que pode ser usado para monitorar, simular e analisar seu comportamento e desempenho. Ao fornecer insights detalhados e análises abrangentes, o DT permite uma compreensão mais profunda das operações em curso, possibilitando a detecção antecipada de problemas, a melhoria dos processos e até mesmo a previsão de tendências futuras. A capacidade de testar cenários e otimizar o desempenho com base em dados em tempo real marca um afastamento crucial das abordagens tradicionais de manutenção e gestão. Ao assimilar o potencial do gêmeo digital, a indústria pode alcançar níveis elevados de adaptação e resiliência, moldando assim um novo paradigma para o setor. Nesse contexto, o conceito de gêmeo digital prova ser um divisor de águas no caminho da indústria rumo à eficiência e inovação [3].

Pedral Sampaio *et al.* [9] esclareceram em seu artigo que conferir inteligência aos edifícios, em especial aos edifícios hospitalares, representa inequivocamente a trajetória iminente. A transformação em direção a imbuir os edifícios com reatividade, interatividade e imersão é inevitável para os sistemas desses edifícios inteligentes. Consequentemente, o valor acrescido da digitalização está pronto para auxiliar os gestores responsáveis pelo FM a enfrentar os desafios, gerindo habilmente as demandas e mitigando as repercussões futuras. A Figura 1 representa os desafios elencados pelos autores.

Figura 1

Desafios digitais na gestão do ambiente construído (adaptado de [9]).



O surgimento do gêmeo digital é um dos desenvolvimentos mais promissores na contínua digitalização deste setor. O DT representa uma replicação virtual e em tempo real de um objeto físico, processo ou sistema. Este equivalente digital facilita o monitoramento contínuo, simulação e análise aprofundada do comportamento e desempenho de um objeto ou sistema específico. Seu papel vai além da mera replicação.

À medida que as indústrias assimilam o potencial do gêmeo digital, seu impacto na adaptação e resiliência torna-se cada vez mais evidente. Esta tecnologia transformadora não é apenas uma ferramenta para eficiência, ela está moldando um novo paradigma para o setor. Em essência, o gêmeo digital representa um momento de ruptura na trajetória das indústrias, desbloqueando possibilidades sem precedentes para eficiência, adaptabilidade e inovação orientada para o futuro.

O poder transformador do DT torna-se ainda mais evidente em sua capacidade de simular diversos cenários e otimizar o desempenho com base em dados em tempo real. Essa mudança em relação às abordagens convencionais de manutenção e gestão representa uma mudança de paradigma, onde as indústrias aproveitam as capacidades dinâmicas do DT para aprimorar eficiência, capacidade de resposta e eficácia operacional geral.

A assimilação do potencial do gêmeo digital dentro da indústria transcende meras melhorias operacionais. Ele lança as bases para níveis aprimorados de adaptação e resiliência. Além de otimizar processos existentes, o DT torna-se útil na formação de uma indústria avançada que antecipa proactivamente desafios e abraça a inovação.

Nesta jornada transformadora, o conceito de gêmeo digital assume o papel de um marco crítico, não apenas como uma ferramenta tecnológica, mas como precursora de eficiência e inovação. Ele indica o compromisso da indústria em permanecer na vanguarda dos avanços tecnológicos, liderando uma nova era caracterizada pela adaptabilidade, resiliência e busca incessante por soluções inovadoras.

Apesar da atual falta de clareza conceptual e da ausência de uma definição formal para o que realmente são os gémeos digitais – tanto no presente como nas perspetivas futuras – a definição proposta neste artigo refere-se a uma representação digital e em tempo real de um determinado objeto ou sistema que pode ser usada para monitorizar, simular e analisar o seu comportamento e desempenho [3].

3. Estrutura de um digital twin

3.1. Termos e definições

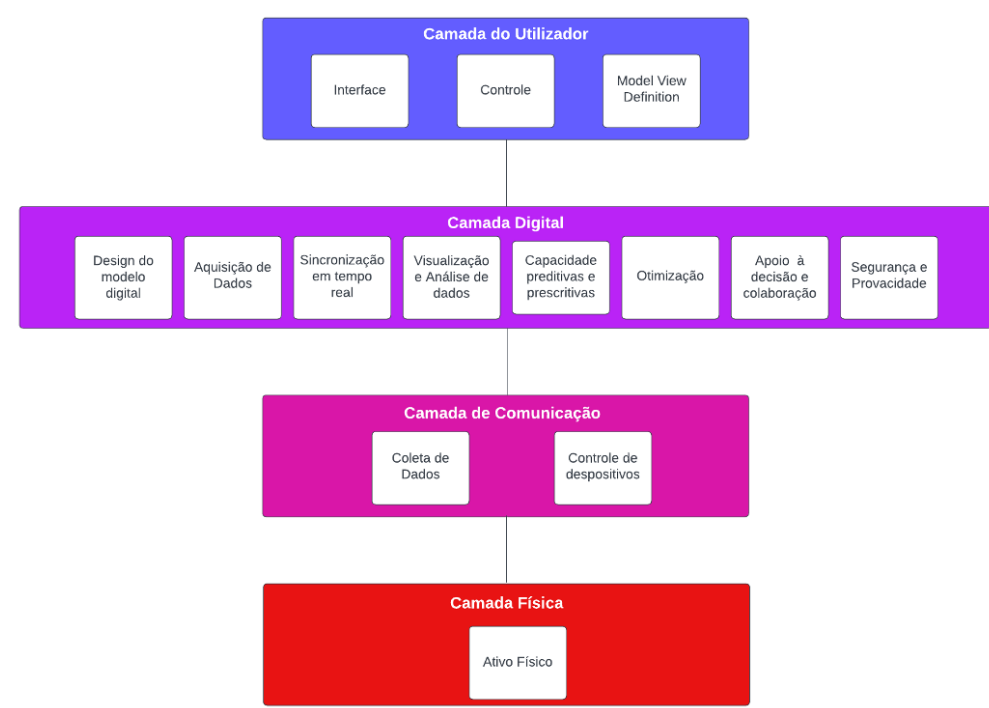
O termo "gémeo digital" remonta a 2002, creditado a Michael Grieves, que introduziu o conceito criando o primeiro modelo de um "gémeo digital" como um modelo conceitual para gestão do ciclo de vida do produto [10].

A arquitetura do DT engloba diversos elementos fundamentais que operam em conjunto para estabelecer uma ligação dinâmica entre o mundo real e o virtual. O DT incorpora uma camada física e uma camada virtual com uma ligação bidirecional contínua entre o objeto físico e a sua contraparte digital. A camada física representa o sistema ou processo físico real, enquanto a camada virtual compreende os dados e o modelo dos sistemas ou processos físicos. A interconexão entre estas camadas física e virtual viabiliza monitorizar, simular, otimizar, controlar, salvaguardar e identificar falhas e padrões intrínsecos, através de um fluxo operacional contínuo, resultando na redução das possibilidades de ocorrência de falhas de origem humana. Cada componente destas dimensões contribui para a integração entre o mundo físico e o virtual, proporcionando não só uma compreensão mais aprofundada do objeto, mas também facilitando a tomada de decisões fundamentadas e a busca pela melhoria contínua.

O conceito fundamental dos gémeos digitais envolve a criação de um sofisticado equivalente virtual para um produto tangível. Esta representação virtual é projetada para espelhar o ativo físico em cada estágio ao longo de todo o seu ciclo de vida, garantindo uma gestão abrangente baseada em dados. Este modelo abrange as quatro camadas essenciais que constituem um Gémeo Digital: a camada do utilizador, a camada digital, a camada de comunicação e a camada física (Figura 2) [11], [12].

A arquitetura do DT engloba elementos fundamentais que estabelecem uma conexão dinâmica entre os mundos real e virtual. O DT incorpora um ativo físico e virtual com uma ligação contínua bidirecional entre o objeto físico e seu equivalente digital. A camada física representa o sistema ou processo físico real, enquanto a camada virtual compreende os dados e o modelo dos sistemas ou processos físicos (Figura 3).

Figura 2
Estrutura conceitual
para um DT (adaptados
de [11]).



A interligação entre estas camadas, físicas e virtuais, permite o monitoramento, simulação, otimização, controle, salvaguarda e identificação de falhas intrínsecas e padrões através de um fluxo operacional contínuo, reduzindo a probabilidade de falhas induzidas pelo ser humano. Cada componente destas dimensões contribui para a integração entre o mundo físico e virtual, proporcionando uma compreensão mais profunda do objeto e facilitando a tomada de decisões informadas e a busca pela melhoria contínua.

Esta abordagem arquitetónica do DT cria uma representação digital precisa do mundo físico e estabelece um ambiente propício à análise avançada, inovação e eficiência operacional. O DT é essencial para impulsionar a excelência operacional e promover a tomada de decisões informadas em diversos domínios, ao fomentar uma ligação dinâmica entre o real e o virtual.

3.2. Camadas essenciais

3.2.1. Camada do Utilizador

A camada de utilizador do DT é a ponte entre o mundo físico e o seu equivalente digital, conhecido como gêmeo digital. A interface do gêmeo digital facilita a comunicação, monitorização, análise e controlo entre a entidade física e a sua réplica digital [12]. Portanto, a primeira camada facilita a interação entre ativos digitais e partes interessadas através da sua interface de *front-end* [13]. É crucial permitir a exploração do DT pelos utilizadores, abrangendo dados e modelos e as suas características distintivas. Em essência, possibilitar uma interação intuitiva,

mas exploratória é necessário, garantindo que os utilizadores possam navegar sem problemas e aprofundar as complexidades dos componentes do Gêmeo Digital.

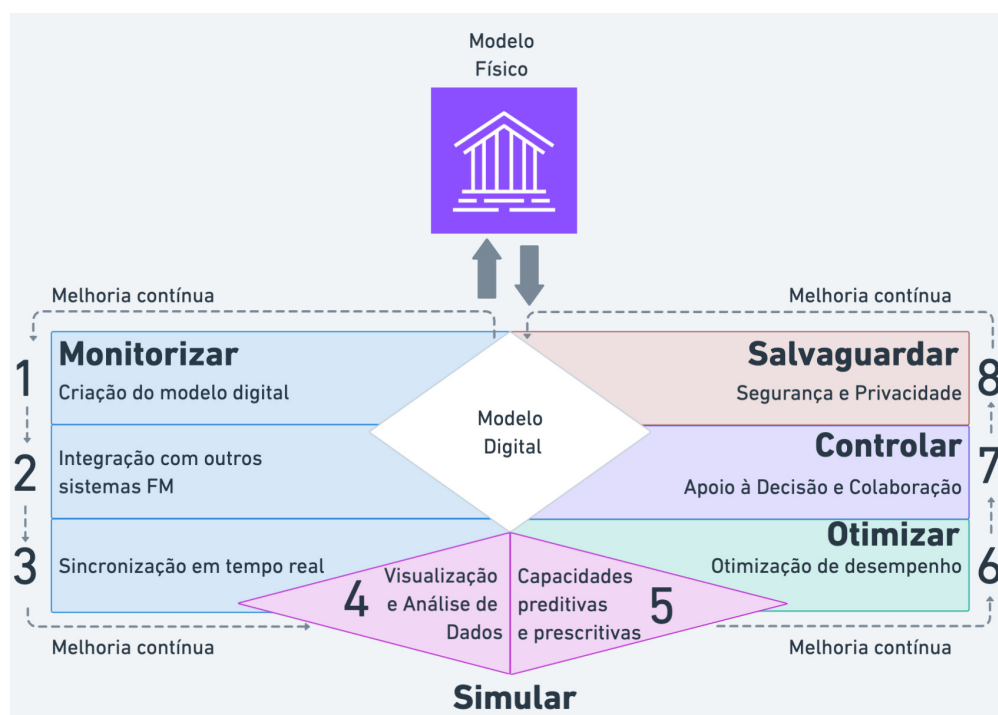


Figura 3
Arquitetura funcional conceitual de gêmeos digitais de ativos físicos.

A camada de utilizador do DT é fundamental para uma representação detalhada da estrutura e operações da instalação. Adaptada para diversos utilizadores, deve ser organizada em unidades específicas para permitir uma exploração focada. A visualização das interconexões é crucial para compreender o funcionamento colaborativo e melhorar a tomada de decisões e eficiência.

A camada de atuação desempenha um papel fundamental no quadro geral da plataforma DT. Servindo como uma interface dinâmica, vai além de uma mera exibição e envolve-se ativamente com as perceções geradas pela camada digital. Esta camada não só apresenta informações legíveis pelo ser humano e visuais derivados dos resultados da camada de aplicação, mas também capacita os utilizadores com a capacidade de compreender e interpretar conjuntos de dados complexos. Além disso, facilita a monitorização e controlo em tempo real, permitindo que os utilizadores tomem medidas imediatas com base nas perceções apresentadas.

Ao fornecer uma ponte entre a camada digital e os utilizadores finais, a camada de utilizador garante que a informação gerada pela plataforma DT seja compreensível e passível de ação. Esta interação dinâmica permite processos de tomada de decisão mais informados, já que os utilizadores podem responder prontamente a condições em mudança ou anomalias detetadas pelo. A camada de utilizador, portanto, constitui um componente decisivo na melhoria da utilidade prática da plataforma DT, oferecendo tanto visualização significativa quanto controlos valiosos para um ambiente operacional mais robusto e responsivo.

3.2.2. Camada digital

Esta camada compreende uma infraestrutura abrangente que inclui o banco de dados, o servidor de banco de dados e as aplicações de controle. Este sistema integrado serve como o repositório de armazenamento e análise de dados, recebendo continuamente atualizações tanto dos componentes físicos, facilitados pela camada de comunicação, quanto da camada dinâmica de utilizador. Esse banco de dados garante um mecanismo de armazenamento robusto, permitindo a organização e recuperação eficiente de dados. Por outro lado, o servidor de banco de dados gerencia o fluxo contínuo de informação entre os vários componentes da plataforma DT [14].

A arquitetura detalhada do DT apresentada na Figura 3 ilustra a utilização estratégica do DT no ambiente construído. Composta por 8 dimensões, esta estrutura abrange todo o ciclo de vida, desde a criação de modelos digitais até a sua otimização e controle em tempo real.

A dimensão 1 envolve a criação de um modelo digital completo e preciso do objeto ou processo físico. Esse modelo serve como uma representação virtual que reflete todas as características e propriedades do mundo real, estabelecendo uma base sólida para todas as dimensões subsequentes. A dimensão 2 é definida pela integração de sistemas diversos, sendo a espinha dorsal de um DT. Esses dados são integrados para formar um conjunto abrangente de informações em tempo real que alimentam o modelo digital, permitindo que ele evolua e se adapte continuamente.

Na dimensão 3, a sincronização contínua entre o modelo digital e os dados do mundo real é o que diferencia um DT de uma representação estática. Essa conexão bidirecional garante que o modelo reflete fielmente as mudanças, atualizações e eventos que ocorrem no objeto ou processo em tempo real. Assim, as dimensões 1, 2 e 3 formam a base essencial da fase de monitorização do objeto.

Com o modelo digital atualizado constantemente, a fase de simulação, aqui repartida em duas dimensões (4 e 5), ganha uma dimensão diferente das simulações realizadas com modelos estáticos. Dessa forma, é possível visualizar e analisar os dados de forma mais clara e aprofundada. Visualizações gráficas e ferramentas de análise permitem entender melhor o comportamento do objeto físico e identificar padrões e tendências relevantes. Além disso, fundamentado na análise de dados, um DT pode desenvolver capacidades preditivas e prescritivas. Isso significa que o modelo pode não apenas prever futuros cenários com base em padrões históricos, mas também sugerir ações específicas a serem tomadas para otimizar o desempenho ou prevenir problemas. Com isso, na dimensão 6 é possível ajustar e otimizar o desempenho do objeto físico em tempo real. Essas otimizações podem variar desde ajustes finos, para melhorar a eficiência, até mudanças substanciais para enfrentar desafios emergentes na gestão do ambiente construído.

A dimensão do controle (dimensão 7), desempenha um papel crucial, trazendo um valor significativo para o seu funcionamento e utilidade em diversos setores. Se, por

um lado, um DT oferece uma base sólida para tomadas de decisão informadas, por outro, facilita a colaboração entre equipas, permitindo que todos trabalhem com um entendimento comum e atualizado sobre o ambiente construído. Dessa forma, com base nas informações fornecidas pelo gémeo digital, os decisores podem ter uma visão mais clara dos possíveis impactos das suas escolhas antes de implementá-las no mundo físico.

De modo a salvaguardar o modelo digital do objeto, a segurança e a privacidade dos dados é fundamental num ambiente digital cada vez mais interconectado e por isso deve ser considerado como parte necessária de uma estrutura de DT, representado na figura 3 pela dimensão 8. Neste sentido, é crítico estabelecer políticas claras sobre como os dados serão recolhidos, armazenados e utilizados nesse gémeo digital, garantindo o cumprimento das regulamentações de privacidade vigentes. Garantir que os dados registados e partilhados são protegidos contra acesso não autorizado é uma dimensão essencial em qualquer implementação. Portanto, os protocolos de segurança a implementar devem permitir identificar possíveis ameaças e vulnerabilidades em tempo real para garantir a segurança dos dados.

Cada uma dessas dimensões operam num ciclo incessante de melhoria contínua. O modelo digital, encontra-se um ciclo iterativo, onde os conhecimentos extraídos através das dimensões anteriores impulsionam ajustes, aperfeiçoamentos e inovações. Esse processo em cíclico assegura que o gémeo digital e, conseqüentemente, o objeto ou processo físico associado, sejam refinados e otimizados de forma contínua para alcançar os melhores resultados. [29]

Além disso, esta camada desempenha um papel fundamental no processamento e análise de dados. Estas aplicações são projetadas para se adaptarem a cenários em evolução, incorporando entradas em tempo real tanto do ambiente físico quanto da camada de utilizador. Ao recolher ativamente os dados coletados, as aplicações de controlo contribuem para a capacidade da plataforma de tomar decisões informadas, implementar ações responsivas e manter a sincronização com os correspondentes físicos.

Esta camada funciona como o sistema nervoso central da plataforma DT, coordenando o fluxo de informação, possibilitando uma análise de dados robusta e garantindo a adaptabilidade necessária para uma tomada de decisão eficaz em ambientes operacionais dinâmicos. As atualizações constantes provenientes tanto das camadas de comunicação quanto da camada de utilizador melhoram a capacidade de resposta da plataforma e contribuem para a sua eficácia global na gestão e otimização dos sistemas conectados.

3.2.3. Camada de comunicação

A camada de comunicação é uma tecnologia fundamental para promover a coordenação bidirecional entre modelos digitais e construção física. Esta camada também colabora com a camada digital para facilitar a troca de dados contínua entre os

componentes físicos e os modelos virtuais. Essa camada abrange várias tecnologias de comunicação, incluindo a Internet e várias redes de comunicação sem fio. Exemplos notáveis dentro deste espectro incluem a rede local sem fio (WLAN), a rede pessoal sem fio (WPAN), identificação por radiofrequência (RFID), USB sem fio, Bluetooth ou tecnologias ZigBee, assim como redes mais amplas como redes de área ampla (WAN) e acesso por micro-ondas com interoperabilidade mundial (WiMAX) [15].

A Internet serve como um quadro global para a transmissão de dados, enquanto tecnologias sem fio como WLAN e WPAN fornecem opções de conectividade local e pessoal. Utilizando RFID, USB sem fio, Bluetooth e ZigBee, estende-se ainda mais o alcance da comunicação dentro de contextos específicos. Além disso, a incorporação de WAN e WiMAX amplia as capacidades de comunicação, garantindo a troca de dados/informações em áreas geográficas mais extensas.

Este conjunto diversificado de tecnologias de comunicação dentro da camada de comunicação aprimora a versatilidade da plataforma DT, permitindo que ela se adapte a vários cenários de rede e integre-se perfeitamente aos espaços físicos e virtuais. A relação entre as camadas de comunicação e digital forma uma ponte crítica, facilitando a troca de dados em tempo real e contribuindo para a capacidade de resposta e eficácia geral do sistema DT.

4. Considerações finais

Num cenário onde a tecnologia e a inovação estão constantemente a moldar as nossas abordagens para a gestão e otimização de processos, o conceito do Digital Twin (DT) emerge como uma ponte dinâmica entre os ambientes físico e virtual.

A estrutura do DT, delineada com os seus distintos elementos interligados, não apenas oferece uma compreensão mais profunda dos sistemas e processos do mundo real, mas também impulsiona a colaboração, a tomada de decisões bem informadas e a constante melhoria. Ao incorporar uma camada física e uma camada virtual, conectadas por uma ligação bidirecional ininterrupta, o DT transcende as limitações da representação estática, permitindo a adaptação, a previsão e a correção em tempo real. A capacidade de monitorizar, simular, otimizar, controlar, salvaguardar e identificar falhas e padrões intrínsecos, com um fluxo operacional ininterrupto, redefine como os desafios do mundo físico são enfrentados.

Ao seguir esta abordagem, a possibilidade de erros humanos é consideravelmente reduzida, enquanto a eficiência, a precisão e a produtividade se elevam. Por fim, neste artigo foi sistematizada graficamente um mapa estratégico para aplicar o DT no ambiente construído, reforçando seu potencial transformador.

Financiamento

Este projeto é financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT), bolsa número 2022.12041. BD e pela unidade de investigação do CERIS (UIDB/04625/2020).

Os Fundos Europeus Estruturais e de Investimento também apoiam este trabalho no componente FEDER através do Programa Operacional de Competitividade e Internacionalização (COMPETE 2020) e no âmbito do Programa Operacional Regional de Lisboa (POR Lisboa) [Projeto n.º 046123; Referência de Financiamento: POCI-01-0247-FEDER-046123 e LISBOA-01-0247-FEDER-046123]. Além disso, o projeto n.º FBR_OC2_100 beneficia de uma bolsa ao abrigo do Fundo de Cidadãos Ativos da Islândia, Liechtenstein e Noruega, através das Bolsas do Espaço Económico Europeu.

Referências

- [1] J. Vieira, J. P. Martins, N. M. de Almeida, H. Patrício, and J. G. Morgado, "Towards Resilient and Sustainable Rail and Road Networks: A Systematic Literature Review on Digital Twins," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 14, no. 12. MDPI, Jun. 01, 2022. doi: 10.3390/su14127060.
- [2] N. Elyasi, A. Bellini, and N. Johanne Klungseth, "Digital transformation in facility management: An analysis of the challenges and benefits of implementing digital twins in the use phase of a building," *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, vol. 1176, no. 1, p. 012001, May 2023, doi: 10.1088/1755-1315/1176/1/012001.
- [3] M. Singh, E. Fuenmayor, E. P. Hinchy, Y. Qiao, N. Murray, and D. Devine, "Digital twin: Origin to future," *Applied System Innovation*, vol. 4, no. 2. MDPI AG, 2021. doi: 10.3390/asi4020036.
- [4] Q. Lu, X. Xie, A. K. Parlikad, and J. M. Schooling, "Digital twin-enabled anomaly detection for built asset monitoring in operation and maintenance," *Autom Constr*, vol. 118, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.autcon.2020.103277.
- [5] A. Johnson *et al.*, "Informing the information requirements of a digital twin: a rail industry case study," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Smart Infrastructure and Construction*, vol. 174, no. 2, pp. 33-45, Feb. 2021, doi: 10.1680/jsmic.20.00017.
- [6] G. Nota, D. Peluso, and A. T. Lazo, "The contribution of Industry 4.0 technologies to facility management," *International Journal of Engineering Business Management*, vol. 13, 2021, doi: 10.1177/18479790211024131.
- [7] F. Muñoz-La Rivera, J. Mora-Serrano, I. Valero, and E. Oñate, "Methodological-Technological Framework for Construction 4.0," *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 28, no. 2, pp. 689-711, Mar. 2021, doi: 10.1007/s11831-020-09455-9.
- [8] A. Rasheed, O. San, and T. Kvamsdal, "Digital twin: Values, challenges and enablers from a modeling perspective," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 21980-22012, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2970143.

- [9] R. Pedral Sampaio, A. Aguiar Costa, and I. Flores-Colen, "A discussion of digital transition impact on facility management of hospital buildings," *Facilities*, Apr. 2023, doi: 10.1108/f-07-2022-0092.
- [10] M. Grieves and J. Vickers, "Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems," in *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches*, Springer International Publishing, 2017, pp. 85-113. doi: 10.1007/978-3-319-38756-7_4.
- [11] ISO 23247-1, "Automation systems and integration-Digital twin framework for manufacturing-Part 1: Overview and general principles," 2021. [Online]. Available: www.iso.org
- [12] ISO 23247-2, "Automation systems and integration-Digital twin framework for manufacturing-Part 2: Reference architecture," 2021. [Online]. Available: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/7a6c23aa-d7d0-4df1-a5d5->
- [13] X. Zheng, J. Lu, and D. Kiritsis, "The emergence of cognitive digital twin: vision, challenges and opportunities," *Int J Prod Res*, vol. 60, no. 24, pp. 7610-7632, 2022, doi: 10.1080/00207543.2021.2014591.
- [14] O. C. Madubuike and C. J. Anumba, "Digital Twin-Based Health Care Facilities Management," *Journal of Computing in Civil Engineering*, vol. 37, no. 2, Mar. 2023, doi: 10.1061/jccee5.cpeng-4842.
- [15] O. C. Madubuike, C. J. Anumba, and E. Agapaki, "Scenarios for digital twin deployment in healthcare facilities management," *Journal of Facilities Management*, 2023, doi: 10.1108/JFM-10-2022-0107.