

ATIVOS MAIS EFICIENTES COM GÊMEOS DIGITAIS: INTEGRAÇÃO BIM E OPERAÇÃO

Renata Castelo-Branco ⁽¹⁾, Paulo Rodrigues ⁽¹⁾, Gaspar Miranda ⁽¹⁾, Samuel Santos ⁽¹⁾,
Bruno Oliveira ⁽¹⁾

(1) Quadrante Engenharia e Consultoria, S.A.

Resumo

A crescente maturidade da metodologia *Building Information Modeling* (BIM) em Portugal tem impulsionado a sua extensão para além das fases de projeto e construção, abrangendo a operação e gestão de ativos. No entanto, a transição entre o modelo BIM estático e a gestão operacional baseada em dados em tempo real continua a representar um desafio técnico e organizacional. Este artigo apresenta o desenvolvimento e validação de um gêmeo digital numa Estação de Tratamento de Águas Residuais (ETAR), integrando modelo BIM, documentação técnica e dados operacionais provenientes do ativo e de laboratório. A solução, implementada através da plataforma Q. BIMConnect, permitiu consolidar 62 pontos de dados, gerar histórico operacional de cinco meses e suportar análises técnicas com impacto direto na eficiência energética e estabilidade do processo. Os resultados demonstram o potencial da abordagem na identificação de oportunidades de poupança energética estimadas em cerca de 3 970 €/mês apenas na fase piloto. O caso de estudo evidencia a importância da interoperabilidade OpenBIM (IFC) e da governação de dados como fatores críticos para a escalabilidade da solução.

1. Introdução

A metodologia *Building Information Modeling* (BIM) tem transformado o setor da Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação (AECO), promovendo maior rigor, colaboração e eficiência em todas as fases do ciclo de vida dos ativos. Em Portugal, a maturidade BIM tem vindo a aumentar, com um número crescente de entidades públicas e privadas a exigir a continuidade do BIM para além da fase de projeto, estendendo-o à construção e à operação. Diversos estudos indicam que a fase de operação e manutenção pode representar mais de 60–80% do custo total do ciclo de vida de um ativo construído [1,2]. A ausência de continuidade digital entre o modelo BIM e os sistemas operacionais resulta frequentemente em perda de informação e fragmentação de dados, comprometendo a qualidade do suporte à decisão [3,4].

A evolução para gémeos digitais representa uma resposta a esta lacuna, permitindo integrar modelos geométricos e semânticos com dados operacionais em tempo real [5]. O presente artigo apresenta um caso de estudo aplicado a uma Estação de Tratamento de Águas Residuais (ETAR), no qual se implementou um gémeo digital com o objetivo de: (i) consolidar modelo BIM e documentação técnica; (ii) integrar dados operacionais em tempo real; (iii) criar histórico consistente para análise; e (iv) identificar oportunidades de otimização energética e operacional.

2. Do BIM ao gémeo digital

A extensão do BIM à fase de operação tem sido enquadrada no conceito de *Asset Information Model* (AIM), conforme definido na ISO 19650 [6]. A norma estabelece princípios de gestão da informação ao longo do ciclo de vida do ativo, promovendo continuidade digital entre projeto, construção e operação. Adicionalmente, o formato IFC (ISO 16739) [7] constitui o principal mecanismo de interoperabilidade OpenBIM, permitindo neutralidade tecnológica e mitigação de risco de dependência de fornecedor.

Apesar dos avanços normativos e tecnológicos, diversos estudos evidenciam que a integração do modelo BIM com sistemas operacionais dinâmicos continua a representar um desafio significativo, particularmente na fase de operação, onde predominam plataformas heterogêneas como *Building Management System* (BMS), *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA) e bases de dados independentes [3,4]. A indústria da construção continua a operar com informação fragmentada e distribuída por múltiplas plataformas, dificultando uma gestão integrada e a exploração da informação a diferentes níveis de detalhe e para distintos perfis de decisão. Diversos autores apontam os gémeos digitais como uma infraestrutura integradora capaz de consolidar dados heterogêneos e suportar processos de decisão multi-escala [5,8,9].

O conceito de gémeo digital evoluiu de representações geométricas enriquecidas para sistemas integrados que combinam (i) modelos físico-geométrico (de base BIM, Sistemas de Informação Geográfica ou outros), (ii) modelos semânticos de dados que conferem camadas de informação relacionadas com os objetos do modelo geométrico, (iii) fluxos contínuos de dados operacionais, também eles alocados geometricamente no mundo digital; e por fim (iv) analítica (automatizada ou não) sobre estes dados que dão suporte à decisão na operação [5,9,10].

No contexto das infraestruturas do sector AECO, os gémeos digitais permitem fazer uma monitorização contínua de parâmetros críticos, suportam otimização energética baseada em analítica de dados em tempo real e viabilizam estratégias de manutenção preditiva, contribuindo para a redução global de *operating expenses* (OPEX) [9,11,12].

3. Gémeos digitais na indústria

Neste contexto, o departamento de gémeos digitais da QUADRANTE, desenvolveu uma metodologia dedicada à transformação digital do setor, e, em parceria com o BUILT CoLAB, criou a plataforma Q. BIMConnect. Esta solução integra modelos BIM com dados operacionais em tempo real, potenciando a gestão inteligente e sustentável de infraestruturas [13]. Neste artigo, apresenta-se a metodologia desenhada para ultrapassar os desafios sentidos pelos profissionais da indústria ao nível da fragmentação de informação e a sua aplicação a um caso de estudo real.

A metodologia proposta para este tipo de projetos estrutura-se em três fases fundamentais:

- Recolha e consolidação dos dados provenientes do ativo em operação, assegurando a sua ingestão, normalização e armazenamento estruturado;
- Análise técnica desses dados por equipas especializadas, com o objetivo de validar a conformidade do desempenho face aos parâmetros de projeto e de exploração, bem como identificar oportunidades de otimização operacional e energética;
- Sistematização dos resultados da análise e apresentação ao operador do ativo, para implementação das recomendações técnicas e a incorporação das melhorias no processo.

Estas fases ocorrem em ciclo contínuo. As melhorias implementadas retroalimentam o sistema com novos dados operacionais, permitindo uma lógica de monitorização contínua, validação recorrente e otimização progressiva do desempenho do ativo.

3.1 Plataforma de gémeos digitais

A solução tecnológica desenvolvida para suportar esta metodologia, a plataforma Q. BIMConnect, assenta em princípios OpenBIM e na utilização de formatos abertos, nomeadamente IFC e COBie, garantindo interoperabilidade entre sistemas, escalabilidade da arquitetura e independência tecnológica ao longo do ciclo de vida do ativo. A arquitetura da plataforma (Figura 1) estrutura-se em três camadas complementares:

- O modelo BIM, tipicamente desenvolvido em ambiente Revit e exportado em formato IFC, constitui a base espacial e semântica do sistema, assegurando o enquadramento geométrico, a estrutura hierárquica do ativo e a identificação unívoca dos seus componentes.
- Os dados operacionais provenientes de múltiplos sistemas, como SCADA, *Internet of Things* (IoT) e BMS. Estes dados são agregados num *data warehouse* central, onde são normalizados, estruturados e preparados para processamento em ambiente *cloud*, permitindo ingestão e atualização em tempo real.
- Serviços de análise conduzidos pela equipa técnica do prestador de serviços, apresentados via *dashboards* interativos, e relatórios periódicos.

Esta abordagem permite que modelo geométrico, documentação e histórico operacional coexistam numa interface única, disponibilizando à equipa de operação uma ferramenta de monitorização contínua, análise de desempenho e apoio fundamentado à tomada de decisão.

3.2 Níveis de gémeos digitais

Na solução Q. BIMConnect, os gémeos digitais são conceptualizados como um processo evolutivo, estruturado em níveis progressivos de maturidade funcional. Esta abordagem permite uma implementação faseada, alinhada com o grau de desenvolvimento digital do ativo e com os objetivos operacionais definidos, começando com um modelo informativo estático que transita de forma gradual para um sistema dinâmico de suporte à decisão, onde o valor gerado aumenta proporcionalmente à integração entre modelo, dados e analítica. A Figura 2 apresenta visualmente este processo de evolução e a Tabela 1 sumariza as funcionalidades e benefícios de cada um dos níveis. O projeto piloto descrito neste artigo incide sobre as camadas ‘Gestão de Informação’ e ‘Integração Operacional’.



Figura 1: Definição da arquitetura funcional da solução.

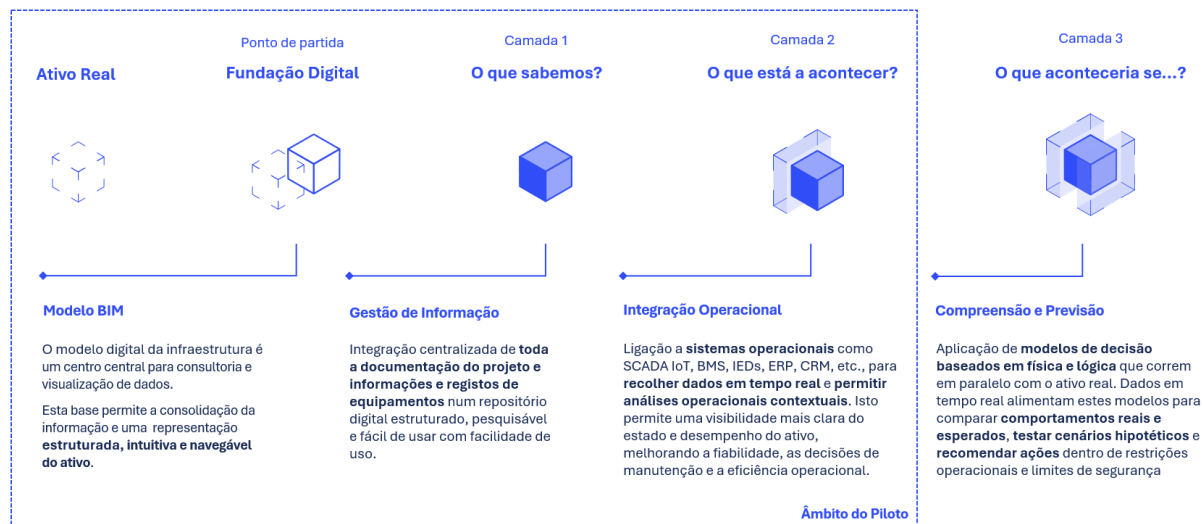


Figura 2: Níveis progressivos de maturidade funcional de um gémeo digital.

4. Projeto piloto

Com o objetivo de validar esta abordagem, foi implementado um projeto piloto na ETAR de Campo-Valongo. Esta ETAR, construída em 1996 para servir as povoações de Valongo, Campo e Sobrado, foi projetada para um horizonte de 40 anos, com implementação faseada de três linhas de tratamento. O processo baseia-se em tratamento secundário por lamas ativadas, com quatro reatores biológicos retangulares e decantação primária, sem remoção de azoto. As lamas primárias e em excesso do tratamento biológico são sujeitas a espessamento, digestão a quente e desidratação mecânica, utilizando o biogás gerado para aquecimento. O efluente é descarregado no Rio Ferreira, cumprindo os parâmetros definidos pelo Decreto-Lei n.º 152/97. No horizonte de 2035, a ETAR está dimensionada para uma população equivalente de 98.278

hab. eq., com caudais médios de 18 553 m³/d em tempo seco e 14 560 m³/d em tempo de chuva, e caudais de ponta de 1 340 m³/h e 1 673 m³/h, respetivamente.

Tabela 1: Caracterização das camadas funcionalidades e seus benefícios operacionais

Camada	Descrição	Funcionalidades	Benefícios
Fundação digital	Base estruturante da informação do ativo ao longo do ciclo de vida	Modelo BIM (IFC, LOD 200, LOI 1); Estrutura hierárquica e parametrização técnica	Fonte única de verdade; Rastreabilidade e consistência de metadados; Redução de perda de dados entre fases
Gestão de informação	Repositório estruturado ancorado no modelo BIM, agregando documentação técnica e operacional	Centralização de documentação ligada ao modelo; Biblioteca pesquisável por ativo ou sistema	Eliminação de dispersão documental; Eficiência em auditorias e inspeções; Disponibilidade de informação
Integração operacional	Consolidação de dados em tempo real provenientes do ativo em operação	Ligação a BMS/SCADA/IoT; <i>Dashboards</i> e indicadores operacionais; Histórico e relatórios	Visibilidade contínua de desempenho; Decisão baseada em dados atualizados; Redução de <i>downtime</i>
Otimização inteligente	Camada analítica que suporta previsão, simulação e melhoria contínua	Modelos preditivos e deteção de desvios; Simulação de cenários operacionais	Redução de OPEX e consumo energético; Aumento da fiabilidade; Suporte a metas de sustentabilidade

4.1 Caracterização do projeto

O piloto foi desenvolvido entre dezembro de 2024 e novembro de 2025, com o objetivo de validar, em contexto real de operação, a integração entre modelo BIM e sistemas operacionais, e quantificar os benefícios na monitorização de desempenho, na manutenção preditiva e na eficiência energética. A implementação incluiu (i) a integração de sensores e sistemas existentes, (ii) o carregamento validado de dados laboratoriais, (iii) o desenvolvimento de interfaces de visualização orientadas à operação e (iv) a capacitação da equipa local para utilização da plataforma. A Figura 3 apresenta o cronograma do projeto.

Do ponto de vista da maturidade digital, o projeto iniciou-se com a consolidação de um modelo BIM estruturado, correspondente ao nível de “Gémeo de Informação”. O modelo foi desenvolvido com LOD 200 e LOI 1, assegurando a representação espacial do ativo e a identificação sistematizada dos seus principais componentes e sistemas (Figura 4). Esta escolha pressupõe um compromisso entre o nível de detalhe do modelo e respetiva informação e a performance na visualização do mesmo na plataforma web desenvolvida. Um desenho distinto de arquitetura da plataforma Q. BIMConnect poderia permitir maiores níveis de LOD e LOI com base noutros compromissos. Numa fase subsequente, procedeu-se à evolução para um “Gémeo de Ligação Operacional”, através da integração de fluxos de dados em tempo real provenientes do sistema SCADA e de registos laboratoriais, introduzindo uma dimensão dinâmica ao modelo informacional (Figuras 5).

Durante o período de monitorização foram integrados 62 pontos de dados, com histórico contínuo aproximado de cinco meses. Este processo resultou na recolha de mais de 13 milhões de registos em tempo real e cerca de 2 milhões de registos laboratoriais, configurando uma base de dados suficientemente extensa para suportar análises técnicas de desempenho operacional e energético.



Figura 3: Cronograma do projeto piloto na ETAR de Valongo.

A metodologia de análise incidiu sobre parâmetros críticos do processo biológico, incluindo concentração de sólidos suspensos, razão de recirculação e oxigénio dissolvido, bem como sobre o desempenho energético dos sistemas de bombagem e arejamento. Os dados foram tratados com resolução temporal de 30 segundos para variáveis de potência e caudal e de cinco minutos para oxigénio dissolvido, permitindo uma análise detalhada do comportamento operacional e a identificação de padrões, desvios e oportunidades de otimização.

4.2 Discussão de resultados

A implementação do gémeo digital na ETAR permitiu converter indicadores operacionais, como carga hidráulica, número de arranques e razão de recirculação, em métricas económicas mensais quantificáveis. Esta capacidade de traduzir desempenho técnico em impacto financeiro revelou-se determinante para suporte à decisão estratégica. Os resultados obtidos podem ser organizados em duas dimensões principais: (i) verificação de conformidade operacional e (ii) identificação de oportunidades concretas de melhoria.

No que respeita à verificação de conformidade, o efluente tratado manteve-se dentro dos limites estabelecidos na licença de descarga ao longo dos cinco meses analisados, evidenciando estabilidade global do processo. A concentração de sólidos suspensos no reator biológico (MS) apresentou valores superiores aos previstos em projeto, enquanto o índice volumétrico de lamas (IVL) se manteve dentro da gama considerada normal (≈ 133 mL/g), ainda que com valores de V30 elevados. A carga mássica (F/M) situou-se no limite superior do intervalo de projeto e a idade de lamas (θ) manteve-se conforme especificado, confirmando a estabilidade estrutural do processo biológico.



Figura 4: Interface da plataforma com o modelo digital da ETAR. Na imagem da direita observa-se a árvore IFC com a documentação e series de dados associados a cada nó, bem como a identificação dos equipamentos monitorizados (bombas) no modelo 3D.



Figura 5: *Dashboard* de análise da operação na componente da ‘qualidade da água.’

Paralelamente, a análise permitiu identificar oportunidades de otimização com impacto económico direto. Na estação elevatória de Sobrado, a carga hidráulica efetiva estimada foi de aproximadamente 30 m, face aos 15 m previstos em projeto, apontando para um potencial de poupança energética na ordem dos 1 500 €/mês. Situação semelhante foi observada no tanque de homogeneizado, onde a carga efetiva (~25 m) excede os valores de projeto (10–15 m), correspondendo a uma poupança mínima estimada de 1 370 €/mês. Adicionalmente, registaram-se até nove arranques por hora nas bombas, o que, para além do impacto energético, representa desgaste acelerado dos equipamentos (Figura 6), com custo estimado de cerca de 1 100 €/mês associado à redução da vida útil. Finalmente, a razão média de recirculação de lamas foi de aproximadamente 140%, significativamente superior aos 82% previstos em projeto, implicando um excedente de consumo energético estimado na ordem dos 40%.

Em conjunto, estes resultados demonstram que, embora o sistema opere em conformidade regulamentar, subsistem margens relevantes de otimização energética e operacional, passíveis de quantificação económica e de implementação faseada. As deficiências identificadas na operação foram objeto de propostas de melhoria por parte da equipa técnica, incidindo em particular sobre os temas apresentados na Tabela 2.

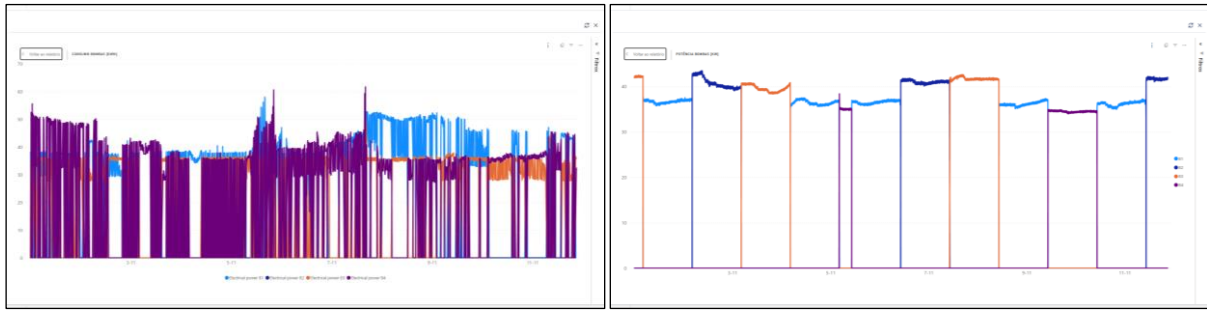


Figura 6: Gráficos de análise do consumo e potência das bombas.

O total de ganhos estimado na fase piloto com melhorias propostas é de $\approx 3\,970$ €/mês. Com a implementação alargada e integração de 23 novos pontos críticos, estima-se um benefício total entre 6 310 e 8 450 €/mês.

Tabela 2: Propostas de melhoria operacional apresentadas em resposta aos temas identificados

Tema	Proposta de Melhoria
Revisão das condições	Inspecionar válvulas, eliminar singularidades desnecessárias, alinhar a carga com o projeto nas linhas de Sobrado e homogeneizado. Efeito esperado: redução de carga e de consumo.
Calibração das sondas	Verificar sondas, caudal de ar e lógica de arejamento para manter o Oxigénio Dissolvido (OD) no valor de referência. Efeito esperado: estabilidade do processo e < energia em arejamento.
Equalização das bombas	Regras de rotação, limites de arranques por hora e tempos mínimos ligados. Efeito esperado: menor desgaste e menor custo de ciclo.
Validação da metrologia	Confirmar caudalímetros de recirculação e de excesso, ajustar <i>setpoint</i> de R de forma gradual. Efeito esperado: manutenção da biomassa com menor consumo.
Consolidação do histórico	<i>Checklist</i> diária de dados, reconciliação com laboratório e revisão semanal de anomalias. Efeito esperado: decisões com base em dados fiáveis.

4.3 Desafios e limitações identificados

Durante o desenvolvimento do piloto foram identificadas limitações técnicas e operacionais que condicionaram parcialmente o alcance das análises realizadas. Estas limitações, sintetizadas na Tabela 3, permitiram não só enquadrar os resultados obtidos, como também fundamentar a definição de medidas de mitigação para a fase de implementação alargada.

A cobertura parcial de pontos monitorizados limitou a análise detalhada de alguns subsistemas, evidenciando a necessidade de um plano estruturado de instrumentação com priorização de pontos críticos. A arquitetura de ingestão, dimensionada para o piloto, revelou margem limitada para expansão, reforçando a importância de escalar a capacidade de retenção e processamento de dados numa fase subsequente.

A metrologia incompleta na recirculação de lamas e a necessidade de calibração das sondas de OD condicionaram a granularidade e fiabilidade de algumas análises energéticas. Entre as limitações, as incidências no *gateway* do cliente tiveram maior impacto, resultando na perda estimada de cerca de 1,9 milhões de registos e em descontinuidades no histórico. Estas ocorrências demonstram que a robustez do gémeo digital depende não apenas da modelação e analítica, mas também da qualidade da instrumentação, conectividade e governação de dados.

Tabela 3: Limitações encontradas no piloto, impactos e medidas de mitigação futuras

Limitação	Impacto	Mitigação na Implementação Alargada
Cobertura parcial de pontos	Histórico e análises limitados em alguns sistemas.	Plano de instrumentação, lista fechada de pontos críticos, priorização por impacto.
Incidências no gateway	Falhas de envio na origem, descontinuidade do histórico.	Monitorização ativa da conectividade, alertas, janela de retentativa e acordo de serviço com metas de disponibilidade.
Ingestão dimens. para piloto	Capacidade definida para o âmbito do piloto, menor margem para expansão.	Escalar ingestão e retenção, compressão por série e partição temporal.
Metrologia incompleta	Sem medição elétrica individual por bomba, análise por grupo.	Medidores por bomba ou estimativa validada, amostragem dedicada.
Calibração de OD a validar	Valores médios abaixo do alvo e sinais pouco coerentes com potência.	Programa de calibração de sondas, verificação de caudal de ar e revisão de lógica de comando.

5. Conclusão

Partindo da premissa de que a descontinuidade entre modelos BIM e sistemas operacionais limita o potencial de criação de valor na fase de operação, este artigo teve como objetivo avaliar a viabilidade e o impacto da integração BIM–Operação através de um projeto piloto numa infraestrutura hidráulica. O caso de estudo na ETAR de Campo-Valongo evidencia que:

- A integração BIM–Operação é tecnicamente viável em contexto real;
- O valor de um gémeo digital ultrapassa a mera integração visual entre modelo BIM e dados operacionais para uma visualização contextualizada da informação;
- Com boa governação de dados, a abordagem analítica permite ganhos energéticos;
- A preparação organizacional é chave para a confiabilidade e rastreabilidade do processo;
- A estruturação de um histórico operacional fiável para alimentar a analítica (identificação de padrões, desvios face ao projeto e oportunidades de otimização) é um fator crítico de sucesso para gerar valor económico e sustentável;
- A interoperabilidade OpenBIM assegura independência tecnológica e escalabilidade para contextos multiativo com sistemas heterogéneos;

Conclui-se, assim, que a transição de BIM para gémeos digitais, quando suportada por arquitetura interoperável, dados fiáveis e metodologia estruturada, pode gerar ganhos operacionais consideráveis na fase de operação. Como trabalho futuro, propõe-se: (i) a validação da escalabilidade e replicabilidade da solução através da aplicação a outras tipologias de infraestruturas, (ii) a expansão da metodologia de forma a incluir capacidade preditiva ou otimização automática, (iii) e, de forma a aumentar a confiabilidade do sistema, o estudo de mecanismos de redundância de comunicação e a inclusão de estratégias de governação de dados e qualidade metrológica como pré-requisito.

Referências

- [1] C. M. Eastman, P. Teicholz, R. Sacks, and K. Liston, *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers, and Contractors*, 2nd ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2011.
- [2] ISO, ISO 15686-5:2017 *Buildings and constructed assets — Service life planning — Part 5: Life-cycle costing*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2017.
- [3] 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, 2012. doi: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000433.
- [4] 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, 2014. doi: 10.1016/j.autcon.2013.10.023.
- [5] C. Boje, A. Guerriero, S. Kubicki, and Y. Rezgui, “Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research,” *Automation in Construction*, vol. 114, 103179, 2020. doi: 10.1016/j.autcon.2020.103179
- [6] ISO, ISO 19650-1:2018 *Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling — Part 1: Concepts and principles*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2018.
- [7] ISO, ISO 16739-1:2018 *Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries — Part 1: Data schema*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2018.
- [8] B. Succar, W. Sher, and A. Williams, “Measuring BIM performance: Five metrics,” *Architectural Engineering and Design Management*, vol. 8, no. 2, pp. 120–142, 2012. doi: 10.1080/17452007.2012.659506.
- [9] R. Sacks, I. Brilakis, E. Pikas, H. S. Xie, and M. Girolami, “Construction with digital twin information systems,” *Data-Centric Engineering*, vol. 1, e14, 2020. doi: 10.1017/dce.2020.16
- [10] M. Grieves and J. Vickers, “Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems,” in *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*, F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt, and A. Alves, Eds. Cham, Switzerland: Springer, 2017, pp. 85–113. doi: 10.1007/978-3-319-38756-7_4.
- [11] F. Tao, Q. Qi, L. Wang, and A. Y. C. Nee, “Digital Twins and Cyber–Physical Systems toward smart manufacturing and Industry 4.0: Correlation and comparison,” *Engineering*, vol. 5, no. 4, pp. 653–661, 2019. doi: 10.1016/j.eng.2019.01.014.
- [12] X. Lu, C. Wu, Z. Wang, L. Zhang, and R. Xue, “A literature review of digital twin in construction industry,” *Journal of Building Engineering*, vol. 43, 103–118, 2021. doi: 10.1016/j.jobbe.2021.103–118.
- [13] Quadrante Global, “*Digital (Q. BIMConnect) — Integrated digital solutions for asset lifecycle*,” *Quadrante Digital*. [Online]. Available: <https://quadranteglobal.com/en/digital/> (accessed Feb. 20, 2026).