

## DE MODELOS BIM ESTÁTICOS A GÉMEOS DIGITAIS DINÂMICOS: UMA ABORDAGEM ABERTA E INTEROPERÁVEL

Nuno Oliveira <sup>(1)</sup>, Hélder Silva <sup>(2)</sup>, Vitor Cardoso <sup>(3)</sup>, Luís Sanhudo <sup>(4)</sup>

(1) BUILT CoLAB, Porto, ID ORCID 0009-0009-6545-1746

(2) BUILT CoLAB, Porto, ID ORCID 0009-0001-9366-4855

(3) BUILT CoLAB, Porto, ID ORCID 0000-0002-4886-2406

(4) BUILT CoLAB, Porto, ID ORCID 0000-0002-2578-6981

### Resumo

A evolução recente do estado da arte em *Building Information Modelling* (BIM) e Gémeos Digitais evidencia a necessidade de soluções, que ultrapassem a visualização de modelos e integrem dados heterogéneos, ao longo do ciclo de vida dos ativos. Persistem limitações ligadas à fragmentação tecnológica, formatos proprietários, dificuldade em incorporar séries temporais e falta de mecanismos inteligentes de monitorização e validação. Este artigo apresenta uma plataforma de Gémeos Digitais que lida com estes desafios, numa abordagem aberta, modular e interoperável. Baseada em *Industry Foundation Classes* (IFC) e tecnologias *open-source*, a solução unifica modelos BIM, documentação multimodal e séries temporais de fontes externas. O *backend* propõe uma arquitetura que combina bases de dados relacionais, cache, armazenamento distribuído e configuração dinâmica de ligações a múltiplas bases de dados de séries temporais, permitindo integração escalável e flexível. Inclui um módulo inteligente com métodos de deteção de anomalias e monitorização da integridade dos fluxos de dados, reforçando a fiabilidade e automatizando diagnósticos. No *frontend*, a plataforma oferece um ambiente *web* unificado com visualização tridimensional de alta *performance*, navegação hierárquica e associação semântica entre elementos BIM, documentação e dados dinâmicos. As interfaces de gestão permitem configuração granular de propriedades, integrações, permissões e histórico, promovendo colaboração. Ao transformar modelos BIM estáticos em representações dinâmicas e continuamente informadas, a plataforma eleva a operacionalização dos Gémeos Digitais no setor da Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação (AECO). O contributo do presente trabalho assenta na combinação de interoperabilidade aberta, integração multimodal e capacidades analíticas inteligentes, constituindo um avanço relevante para a gestão adaptativa de ativos construídos.

## 1. Introdução

O conceito de Gémeo Digital foi introduzido por Michael Grieves em 2003 no contexto da gestão do ciclo de vida de produtos, definindo-o como uma representação virtual [1] ligada ao seu equivalente físico através de fluxos bidirecionais de dados [2]. Trabalhos posteriores, nomeadamente Tao et al. [3], expandiram este conceito descrevendo-o como um sistema integrado que combina entidades físicas, modelos virtuais, dados e serviços.

No setor AECO, esta perspetiva contrasta com o *Building Information Modelling* (BIM), que permanece predominantemente centrado nas fases de projeto e construção, sem ligação contínua ao ativo físico. Consequentemente, os modelos BIM são frequentemente subutilizados após a entrega da obra, desperdiçando informação geométrica e semântica com potencial para suportar a fase operacional, que representa a maior parcela do ciclo de vida dos ativos.

Este trabalho propõe uma plataforma de Gémeos Digitais, concebida como uma infraestrutura genérica para integração de modelos BIM e dados operacionais dinâmicos, ao longo do ciclo de vida de ativos construídos. A plataforma permite a associação de elementos de modelos IFC a séries temporais provenientes de sistemas heterogéneos, suportando diferentes domínios de aplicação através de mecanismos de configuração dinâmica e integração de dados distribuídos. A arquitetura assenta em três princípios fundamentais: (i) utilização exclusiva de formatos abertos e interoperáveis; (ii) acesso a fontes de dados externas sem centralização obrigatória; e (iii) uma arquitetura modular orientada a eventos, promovendo extensibilidade, escalabilidade e independência tecnológica.

Neste contexto, as principais contribuições deste trabalho incluem: (i) uma arquitetura aberta e interoperável, baseada exclusivamente em tecnologias *open-source* e no formato IFC; (ii) um modelo de integração distribuída que permite associar séries temporais externas a elementos BIM sem necessidade de centralização de dados; (iii) um mecanismo de sincronização bidirecional entre a representação espacial 3D e a estrutura hierárquica de elementos do modelo; e (iv) uma plataforma funcional validada em ambiente operacional real com dados de infraestruturas críticas.

As secções seguintes apresentam o enquadramento de requisitos e limitações (Secção 2), a implementação técnica da plataforma (Secção 3), a discussão e desenvolvimentos futuros (Secção 4) e as conclusões (Secção 5).

## 2. Enquadramento de Requisitos e Limitações

A interoperabilidade constitui um desafio central na implementação de Gémeos Digitais no setor AECO. O formato IFC, desenvolvido pela buildingSMART e normalizado como ISO 16739 [4], emergiu como principal *standard* aberto para representação e troca de dados BIM. Baseado na linguagem EXPRESS, o IFC define uma estrutura semântica orientada a objetos que representa geometria, propriedades e relações hierárquicas e funcionais entre elementos. Dai et al. [5] demonstraram que entidades como *IfcTask*, *IfcWorkPlan* e *IfcResource* permitem representar processos e recursos, expandindo o seu âmbito para além da modelação geométrica. Apesar destas capacidades, a adoção prática do IFC enfrenta limitações relevantes. Processos de interoperabilidade entre diferentes ferramentas resultam frequentemente na perda de informação, particularmente ao nível de propriedades e relações semânticas. A complexidade do *schema*, com mais de 800 entidades na versão IFC4 [6], constitui também um obstáculo à

sua implementação consistente. Estas limitações técnicas do IFC são agravadas por lacunas identificadas na literatura sobre soluções de Gémeos Digitais para o setor AECO. A maioria das plataformas comerciais apresenta quatro problemas recorrentes: (i) dependência de formatos proprietários que restringem interoperabilidade; (ii) exigência de centralização de dados operacionais, conflituando com políticas de gestão organizacional; (iii) capacidades analíticas limitadas a limiares estáticos, sem suporte para regras temporais complexas; e (iv) arquiteturas monolíticas que dificultam extensibilidade e escalabilidade. Trabalhos recentes demonstram a viabilidade técnica da integração em tempo real entre modelos IFC e dados operacionais [7], validando a abordagem conceptual. No entanto, persiste a necessidade de utilização de *frameworks* que integrem de forma coerente modelos BIM, dados temporais e documentação, mantendo autonomia sobre as fontes de dados originais.

Nenhuma abordagem existente assegura simultaneamente interoperabilidade baseada em *standards* abertos, preservação da descentralização dos dados e capacidades analíticas extensíveis no âmbito de uma arquitetura unificada. Em resposta às limitações identificadas, a abordagem proposta operacionaliza as contribuições introduzidas na Secção 1, através de quatro contribuições principais: (i) uma arquitetura completamente baseada em *standards* abertos e tecnologias *open-source*, eliminando dependências de fornecedores; (ii) um modelo de consultas que preserva dados nas fontes originais, respeitando autonomia organizacional; (iii) sincronização bidirecional determinística entre representações 3D e hierárquicas com latência controlada; e (iv) um motor de regras extensível com processamento distribuído próximo das fontes de dados. Estas características endereçam diretamente as limitações identificadas, posicionando a abordagem proposta como uma alternativa tecnicamente robusta e escalável face às soluções comerciais predominantes.

### 3. Implementação e soluções técnicas

A arquitetura da plataforma segue um modelo em três camadas – visualização, orquestração e dados - conforme ilustrado na *Figura 1*. Esta separação permite desacoplamento funcional entre interface, lógica de negócio, persistência e processamento analítico.

A camada de visualização fornece a interface interativa baseada em tecnologias web, enquanto a camada de orquestração atua como intermediário através de uma *Application Programming Interface* (API) baseada em arquitetura *Representational State Transfer* (REST) e canais de comunicação em tempo real. A camada de dados assegura persistência e acesso eficiente à informação, e o módulo de inteligência executa avaliação contínua sobre fluxos de dados temporais. Esta arquitetura promove escalabilidade, extensibilidade e independência tecnológica entre componentes.

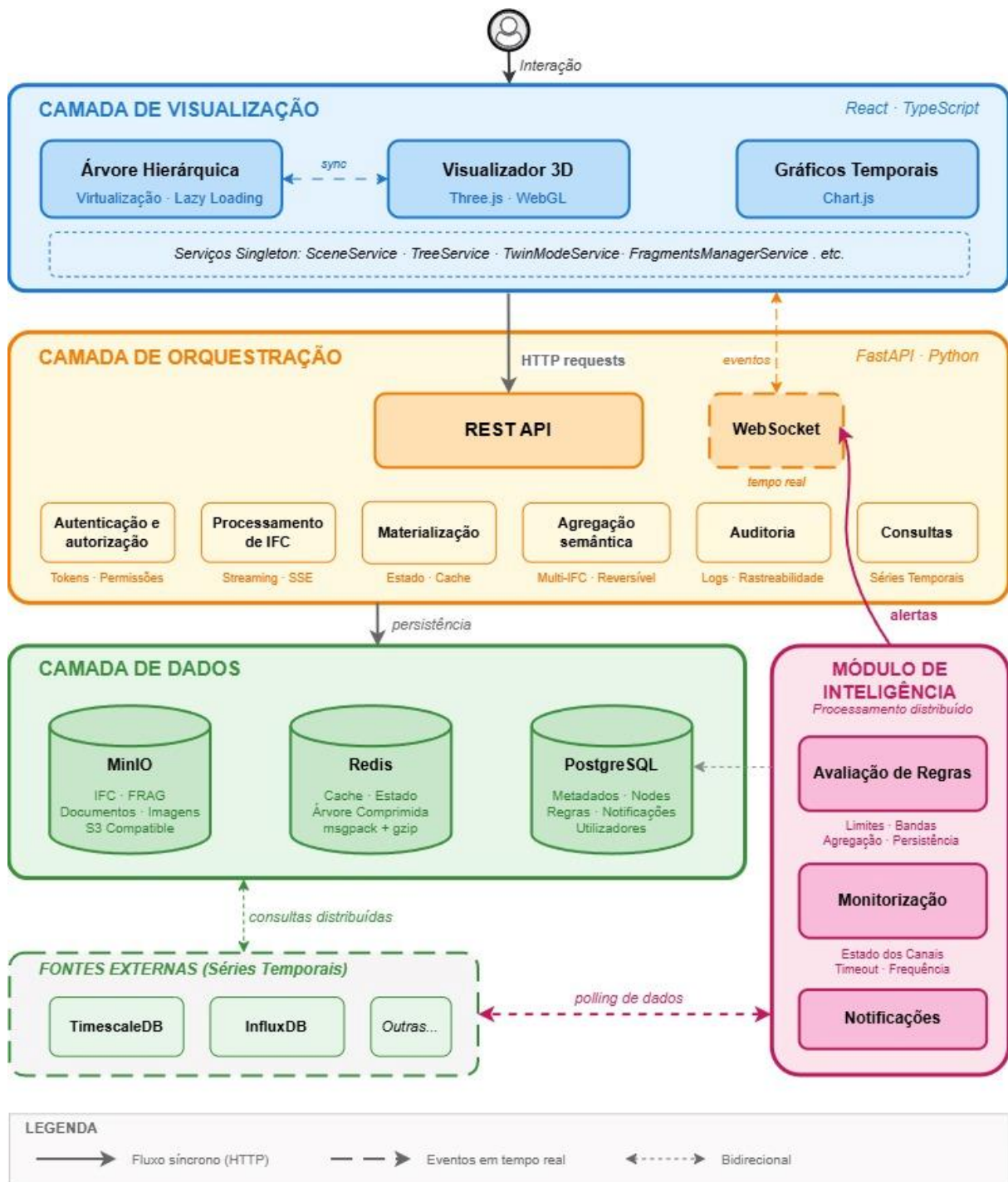


Figura 1 – Arquitetura modular da plataforma de Gémeo Digital

### 3.1. Camada de visualização: Sincronização, escalabilidade e interação

A camada de visualização constitui a interface entre o utilizador e o Gémeo Digital, integrando três domínios: representação geométrica 3D, estrutura hierárquica semântica e dados dinâmicos. Esta integração introduz desafios de sincronização, escalabilidade e coerência,

nomeadamente: (i) sincronização bidirecional entre vistas; (ii) *performance* em modelos de grande dimensão; e (iii) extensibilidade para novas fontes de dados.

A solução desenvolvida para a camada de visualização adotou uma arquitetura de serviços modulares orientada a eventos, tão desacoplados quanto possível entre si e em relação à lógica de renderização da interface, constituindo uma única fonte de verdade para cada domínio da aplicação. Esta arquitetura baseia-se na combinação de dois padrões – Instância Única e Publicação/Subscrição (*Singleton* e *Publisher/Subscriber*) – sendo cada domínio da interface gerido por um serviço especializado que mantém o seu próprio estado e notifica os subscritores, de forma individual ou global, sempre que ocorrem alterações relevantes. Esta abordagem permite que os componentes visuais reajam a mudanças de estado sem acoplamento direto entre si.

O mecanismo de sincronização bidirecional assegura a coerência entre a vista espacial 3D e a vista hierárquica em árvore. A implementação baseia-se em dois componentes principais: um mapeamento elemento-nó, gerado durante o carregamento do modelo, que associa identificadores IFC aos nós correspondentes na árvore, permitindo tradução direta entre domínios sem travessias hierárquicas; e um padrão de guarda de origem (*origin guard pattern*), no qual o serviço de cena mantém uma *flag* que indica se a alteração de seleção teve origem na cena 3D ou na árvore. Quando a seleção é iniciada na cena, o serviço consulta o mapeamento e atualiza a árvore; quando é iniciada na árvore, a guarda é ativada antes da propagação para a cena, prevenindo recursividade. A guarda é desativada após a operação, garantindo a propagação correta de eventos subsequentes e uma sincronização determinística e de baixa latência.

A escalabilidade e a gestão de desempenho, tanto da cena 3D como da interface contextual, tornam-se críticas ao trabalhar com modelos BIM complexos que geram hierarquias com dezenas de milhares de nós. Para garantir responsividade, o sistema implementa estratégias que reduzem alocações redundantes e evitam a renderização de elementos não visíveis. Entre estas destacam-se: a reutilização de instâncias de objetos 3D ou determinados valores de referência (e.g. *Vector3*, *Matrix4*, etc), eliminando alocações de memória durante atualizações; *frustum culling* para excluir *datapoints* fora do campo de visão antes do cálculo de projeções; virtualização da hierarquia em árvore, em que apenas os nós visíveis na *viewport* são renderizados, sendo os restantes representados por *placeholders*; execução de operações de filtragem e pesquisa sobre estruturas em memória, em vez do DOM (*Document Object Model*), reduzindo significativamente o número de elementos ativos; e *clustering* baseado em indexação espacial (*spatial hash grid*), que reduz a complexidade de  $O(n^2)$  para  $O(n)$ .

A ancoragem espacial das séries temporais é realizada através do posicionamento de *datapoints* nos elementos BIM correspondentes, utilizando o centro da *bounding box* como posição representativa (*Figura 2*). Quando múltiplos *datapoints* se sobrepõem no espaço de ecrã, são agrupados num *cluster* com indicação da contagem e possibilidade de expansão por interação do utilizador. As atualizações de *clustering* são sincronizadas com o ciclo de renderização: durante o movimento da câmara são limitadas (*throttled*) a intervalos de 100 ms e, em repouso, executadas imediatamente, garantindo que estes cálculos não comprometem a fluidez da navegação.

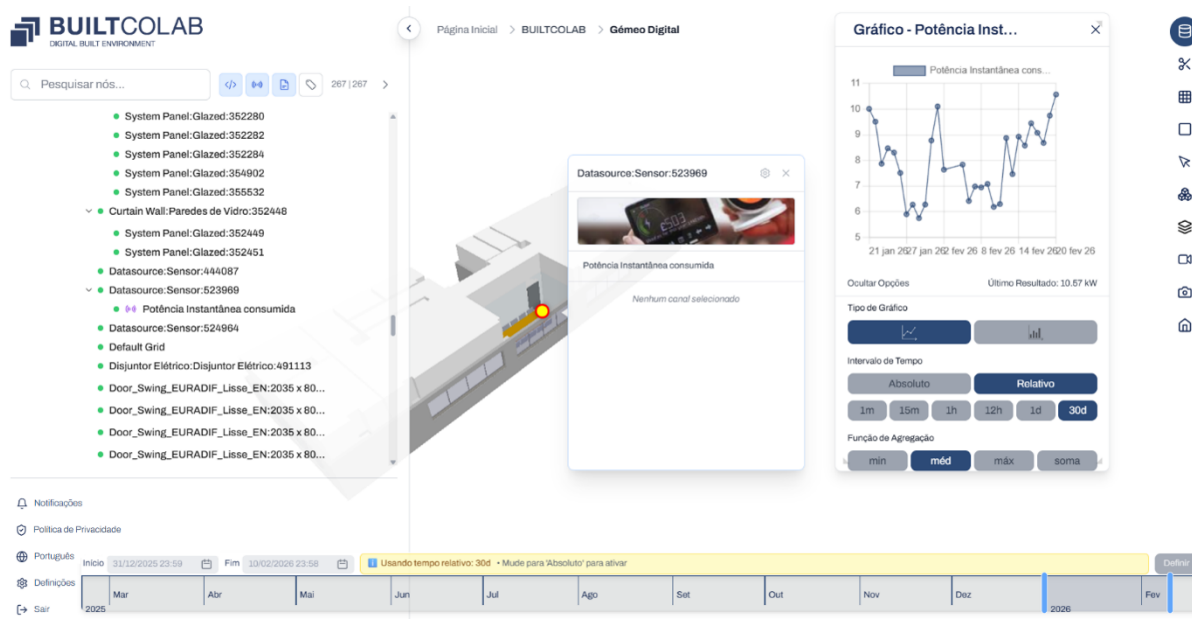


Figura 2- Visualização de séries temporais associadas a elementos do modelo

### 3.2 Camada de Serviços: Orquestração

A camada de orquestração atua como coordenador central da plataforma, expondo uma API REST que abstrai a complexidade dos sistemas subjacentes e articula a interação entre as camadas de visualização e de dados, gerindo fluxos assíncronos, políticas de acesso e uma representação consistente do estado global do sistema.

A gestão de acesso baseia-se num mecanismo de autenticação e autorização baseado em *tokens*, suportado por um modelo de permissões em três níveis (*root*, *admin* e *viewer*), que controla o acesso a projetos, recursos e operações sensíveis. O *onboarding* de utilizadores é realizado através de convites por email com *tokens* temporários, permitindo acompanhar explicitamente o ciclo de vida de cada utilizador desde o convite até à ativação.

O processamento de ficheiros IFC é tratado como uma operação assíncrona de longa duração, refletindo a complexidade inerente à ingestão de modelos BIM de grande dimensão. Durante o *upload*, o progresso é transmitido ao *frontend* através de *Server-Sent Events* (SSE), permitindo acompanhar fases sucessivas como ingestão do ficheiro, extração de entidades, construção e consolidação da hierarquia e atualização do estado operacional. Esta abordagem assegura *feedback* contínuo para o utilizador e evita bloqueios da interface durante operações potencialmente demoradas.

Para garantir responsividade sob carga, a plataforma adota um padrão explícito de separação entre operações de leitura e escrita, suportado por instâncias de base de dados distintas e *pools* de conexão dedicados. As operações de escrita e de consistência centralizam-se na base primária, enquanto consultas de leitura intensiva podem ser encaminhadas para réplicas, reduzindo a contenção de recursos durante processos assíncronos de elevada carga. Apesar de partilharem o mesmo sistema de persistência, estes fluxos utilizam mecanismos de acesso isolados, assegurando que pedidos concorrentes continuem a ser servidos normalmente, mesmo durante operações exigentes como o carregamento de modelos IFC ou a reconstrução de hierarquias.

A camada de orquestração integra ainda um serviço de materialização de estado baseado em Redis, responsável por manter uma representação atualizada da árvore hierárquica dos projetos. Ao deslocar para o *backend* o custo computacional da construção e atualização desta estrutura, o *frontend* passa a consumir apenas uma imagem estável do estado atual, limitando-se à sua renderização e à interação via API, sem necessidade de processamento adicional ou acesso direto a estruturas complexas.

São igualmente implementados nesta camada serviços de alto nível específicos do domínio, como o mecanismo de unificação de hierarquias provenientes de múltiplos ficheiros IFC. Este serviço permite consolidar nós semanticamente equivalentes numa única representação operacional, preservando histórico completo das transformações para possibilitar reversão futura e garantindo coerência semântica entre diferentes fontes.

Por fim, a comunicação em tempo real é suportada por um servidor Socket.IO integrado, responsável pela transmissão de eventos relevantes – como alertas ou alterações de estado – para clientes conectados. Todas as operações críticas da plataforma são registadas com metadados estruturados, assegurando rastreabilidade completa e suporte a auditoria.

### **3.3. Camada de dados: Armazenamento, integração e inteligência**

A camada de dados constitui o núcleo semântico e analítico da plataforma, combinando armazenamento estruturado, cache de alto desempenho e processamento contínuo para deteção proativa de anomalias. É responsável por preservar a ligação entre o modelo BIM e os dados operacionais, executar a lógica de monitorização junto das fontes e fornecer informação consistente e imediata à camada de orquestração.

O armazenamento estruturado assenta em PostgreSQL, persistindo metadados de projetos, utilizadores, regras, notificações e a hierarquia extraída de modelos IFC. A abstração *Node* representa uniformemente elementos BIM, documentos e canais de dados, permitindo enriquecer progressivamente a árvore hierárquica sem alterar os ficheiros IFC originais e preservando sempre a ligação semântica através dos respetivos identificadores.

Os canais de dados funcionam como ponte entre o modelo semântico e séries temporais externas, encapsulando os metadados necessários para identificar e consultar dados de sistemas heterogéneos. Esta abordagem permite integrar múltiplas fontes externas sem migração ou centralização, garantindo flexibilidade, escalabilidade e coerência semântica.

O Redis atua como cache e serviço de materialização de estado, mantendo uma versão atualizada da árvore hierárquica para acesso eficiente. Atualizações incrementais da árvore – incluindo a adição, modificação ou remoção de nós que representam elementos do modelo BIM, documentos associados ou canais de dados – são aplicadas de forma inteligente, mantendo o estado sempre consistente para os consumidores da API.

O MinIO assegura persistência de ficheiros binários, como modelos IFC originais, fragmentos, documentação ou multimédia, através de uma API compatível com S3, permitindo migração transparente entre infraestruturas locais e *cloud*.

O módulo de inteligência opera continuamente sobre fluxos de dados temporais, avaliando a integridade e o estado dos canais e aplicando regras de monitorização configuradas pelos utilizadores. O processamento é distribuído de forma eficiente, mantendo *buffers* locais de dados e garantindo que a avaliação de regras, a deteção de anomalias e a monitorização de saúde dos canais ocorrem próximo das fontes de dados. Alertas e alterações relevantes de estado são persistidos e propagados em tempo real para a camada de orquestração, assegurando que os clientes conectados recebem informação atualizada de forma imediata e consistente.

## 4. Discussão

A plataforma apresentada demonstra que é possível implementar um sistema de Gémeos Digitais para infraestruturas sem dependências proprietárias, utilizando exclusivamente o formato IFC para modelos BIM e tecnologias *open-source* para persistência, processamento e visualização. As decisões arquiteturais descritas na Secção 3 respondem diretamente às limitações identificadas no enquadramento inicial.

A arquitetura foi concebida para suportar a monitorização integrada de infraestruturas complexas, permitindo correlacionar informação espacial, temporal e semântica em contextos como infraestruturas técnicas, sistemas industriais ou ativos distribuídos. Em particular, a capacidade de suportar o carregamento de múltiplos modelos IFC num mesmo projeto, com unificação automática de elementos semanticamente equivalentes através dos respetivos GlobalId ao nível de categorias como IfcProject, IfcSite, IfcBuilding ou IfcBuildingStorey, permite compor representações coerentes a partir de modelos distintos, tipicamente associados a diferentes especialidades, mantendo consistência hierárquica e suportando cenários de integração progressiva de informação.

A navegação bidirecional entre o modelo tridimensional e as séries temporais associadas permite contextualizar espacialmente a informação monitorizada, facilitando a sua interpretação. O mecanismo de definição de regras configurável promove a autonomia dos utilizadores finais, possibilitando a adaptação a diferentes cenários operacionais sem necessidade de desenvolvimento adicional.

O modelo de consultas, suportado pelo mecanismo de canais como ponte semântica, constitui uma contribuição diferenciadora face ao paradigma predominante de centralização de dados.

A solução apresenta limitações que devem ser reconhecidas. A sincronização é atualmente unidirecional: dados fluem do mundo físico para o modelo digital, mas a plataforma não implementa atuação sobre sistemas de controlo. As capacidades analíticas baseiam-se em regras determinísticas predefinidas;

### 4.1. Caso de aplicação

A plataforma foi validada em contexto operacional real numa estação de tratamento de águas residuais (ETAR) com capacidade para cerca de 100 mil habitantes e caudal máximo de aproximadamente 40 mil m<sup>3</sup>/dia. O modelo BIM da infraestrutura, no formato IFC, contém a representação geométrica e semântica dos equipamentos e sistemas, incluindo unidades de tratamento, sistemas de bombeamento e equipamentos de monitorização. Foram configurados canais de dados para monitorização de parâmetros operacionais críticos - caudal, pH, temperatura, níveis de tanques, pressão em condutas e estado de equipamentos eletromecânicos - associados a elementos específicos do modelo. A plataforma permite que operadores naveguem pelo modelo 3D, identifiquem equipamentos e consultem séries temporais em tempo real, contextualizando espacialmente a informação monitorizada. A interface suporta ainda a associação de documentação técnica aos elementos do modelo, criando um repositório integrado de informação operacional.

O caso de estudo demonstrou a viabilidade da abordagem proposta, confirmando que consultas distribuídas a bases de dados externas são adequadas para monitorização operacional e que a hierarquia semântica do IFC pode ser explorada para contextualização espacial de dados dinâmicos.

## 4.2. Avaliação de desempenho

O desempenho da plataforma resulta de decisões arquiteturais orientadas à responsividade e escalabilidade. A separação explícita entre operações de leitura e escrita, combinada com o serviço de materialização de estado em Redis, permite manter elevada responsividade mesmo durante operações de carga intensiva. O mecanismo de atualizações incrementais evita reconstruções dispendiosas da árvore hierárquica, enquanto a comunicação em tempo real através de Socket.IO assegura latências inferiores a 100 ms na propagação de eventos e notificações.

A interface foi validada através de um painel de monitorização integrado, com testes conduzidos em modelos de diferentes dimensões. Em modelos até cerca de 5.000 elementos, a plataforma mantém consistentemente 60 *frames per second* (FPS); em modelos de maior dimensão, até 100.000 elementos, a taxa de atualização situa-se entre 30 e 45 FPS em *hardware* dedicado. A conversão de modelos IFC para fragmentos binários otimizados resulta em reduções típicas de 70–90% no tamanho dos ficheiros, com tempos de carregamento inicial entre 2 e 8 segundos consoante a dimensão do modelo. Algoritmos de *clustering* espacial com complexidade  $O(n)$  asseguram responsividade na visualização de marcadores mesmo em cenas densas.

Relativamente às consultas de séries temporais, o sistema de agregação automática ajusta dinamicamente a granularidade em função do intervalo solicitado: consultas de dados diários com agregação por minuto completam-se em menos de 500 ms, consultas mensais com agregação horária em menos de 1 segundo, e consultas anuais com agregação diária em menos de 2 segundos, conforme adaptador de base de dados. A taxa de acerto em *cache* situa-se em cerca de 70% para consultas repetidas, reduzindo significativamente a carga sobre as bases de dados externas.

## 4.3. Desenvolvimentos futuros

As limitações identificadas apontam direções claras para o desenvolvimento futuro da plataforma. A expansão das capacidades analíticas constitui uma prioridade, nomeadamente através da incorporação de técnicas de *machine learning* para deteção de padrões anómalos que escapam a regras determinísticas. Estas técnicas permitirão identificar anomalias emergentes, degradações graduais e correlações entre variáveis sem exigir definição prévia de limiares, complementando o motor de regras existente com capacidades de aprendizagem adaptativa.

A evolução para sincronização bidirecional representa outro eixo fundamental de desenvolvimento. A implementação de mecanismos de atuação sobre sistemas de controlo permitirá que a plataforma transcenda a monitorização passiva, elevando o nível de maturidade do gémeo digital e aproximando-o de cenários de automação e otimização operacional em tempo real.

A validação prolongada em ambiente de produção, com cargas de trabalho substancialmente superiores e requisitos de disponibilidade contínua, permitirá identificar eventuais limitações de robustez e escalabilidade não evidenciadas no presente contexto de investigação aplicada. Finalmente, o desenvolvimento de módulos de simulação e previsão, capazes de gerar cenários futuros baseados em dados históricos e em tempo real, abrirá possibilidades para antecipação de falhas e suporte a decisões de planeamento proativo.

## 5. Conclusões

Este artigo abordou uma plataforma de Gémeos Digitais para o setor AECO que endereça lacunas significativas nas soluções existentes, nomeadamente a dependência de formatos proprietários, a exigência de centralização de dados e a ausência de capacidades analíticas integradas com a semântica BIM.

A arquitetura proposta assenta em três camadas funcionalmente desacopladas - visualização, orquestração e dados - implementadas exclusivamente com tecnologias *open-source* e o formato IFC como *standard* de interoperabilidade. As principais contribuições técnicas incluem a sincronização bidirecional determinística entre representações 3D e hierárquicas, estratégias de escalabilidade baseadas em *clustering* espacial e virtualização de hierarquias, um modelo de integração distribuída através de canais como ponte semântica que preserva a autonomia sobre fontes de dados externas, e um módulo de inteligência com processamento distribuído.

A validação em contexto operacional real demonstrou a viabilidade da abordagem proposta e a arquitetura apresentada demonstra ser possível construir soluções tecnicamente competitivas que preservam a autonomia das organizações sobre os seus dados e ferramentas, contribuindo para a democratização do acesso a tecnologias de Gémeos Digitais no setor AECO.

## Agradecimentos

Este trabalho tem ainda o cofinanciamento do PRR – Plano de Recuperação e Resiliência e União Europeia – [www.recuperarportugal.gov.pt](http://www.recuperarportugal.gov.pt) | PRR – Investimento RE-C05-i02: Missão Interface – CoLAB.

## Referências

- [1] C. M. Eastman, P. Teicholz, R. Sacks, e K. Liston, BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers, and Contractors, Hoboken, N.J.: Wiley, 2008.
- [2] M. Grieves e J. Vickers, Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems, in Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems, Springer, 2017.
- [3] F. Tao, Q. Qi, A. Liu, e A. Kusiak, Digital Twin in Industry: State-of-the-Art, IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019.
- [4] ISO TC184/SC4, ISO 16739:2013 Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries, International Organization for Standardization (ISO), 2013.
- [5] C. Dai, K. Cheng, e B. Liang, Digital Twin Modeling Method Based on IFC Standards for Building Construction Processes, Journal of Computing in Civil Engineering, 2021.
- [6] BuildingSMART International, Industry Foundation Classes (IFC) – ISO 16739, 2020. <https://www.buildingsmart.org/standards/bsi-standards/industry-foundation-classes/>
- [7] M. Sedigh e J. Müller, IFC-based Digital Twin for Real-Time Building Data Integration and Its Case Study, Journal of Physics: Conference Series, 2025.