

Gêmeos Digitais em Laboratórios Inteligentes: Implementação Inicial no Sistema de Climatização

**Felipe Tavoni, Júlio Cesar Estrella, André Luiz Santos Messias,
André Vargas Villalba Codorniz**

Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação
Universidade de São Paulo (USP)
São Carlos – SP – Brazil

{felipe.tavoni, andre.messias, andrevillalba}@usp.br, jcezar@icmc.usp.br

Abstract. *Smart cities have gained traction by enhancing operational efficiency in building management, particularly in response to population growth. In Brazil, federal laws applied to the building life cycle have been gaining prominence in public engineering. In this context, digital twins are emerging as essential tools for integrating the building life cycle. The transition from the physical to the virtual environment presents significant challenges, particularly regarding data integration and the usability of open technologies. This article presents an experimental study of a digital twin implemented in a laboratory setting, combining the robustness of an open-source framework with the abstraction provided by an interactive visual interface. This investigation identifies strategies that simplify the transition from the physical to the virtual environment. The study highlights mechanisms that enhance data interoperability and reduce modeling complexity, providing practical insights for future implementations.*

Resumo. *Cidades inteligentes têm ganhado força por elevar a eficiência operacional na gestão de edificações, sobretudo diante da crescente populacional. No Brasil, leis federais aplicadas ao ciclo de vida das construções vêm ganhando notoriedade na engenharia pública. Nesse contexto, gêmeos digitais emergem como ferramentas essenciais para integrar o ciclo de vida das construções. No entanto, a transposição do real para o virtual não é uma tarefa simples, especialmente ao lidar com a integração de dados e a usabilidade de tecnologias abertas. Assim, este artigo apresenta um estudo experimental de um gêmeo digital aplicado a um laboratório, combinando a robustez de um framework Open Source com a abstração de uma interface visual interativa. Ao investigar estratégias que simplifiquem a transposição do ambiente físico para o virtual, observamos mecanismos para aprimorar a interoperabilidade dos dados e reduzir a complexidade da modelagem, oferecendo insights práticos para futuras implementações.*

1. Introdução

Gêmeos digitais vêm transformando a forma como projetamos, operamos e inovamos atualmente. Diferentemente de soluções isoladas, como sensores que coletam dados ou equações que modelam um determinado aspecto, o gêmeo digital cria uma cópia virtual que simula o comportamento do mundo físico de forma contínua e holística. Entretanto,

é um conceito acompanhado por uma falta de padronização que pode diluir seu conceito e resultar em aplicações ineficazes da tecnologia [VanDerHorn and Mahadevan 2021].

Dentre suas aplicabilidades, uma vertente se destaca: a aplicação a edifícios inteligentes. Como um componente micro de cidades inteligentes, os centros urbanos utilizam-se da tecnologia para melhorar a qualidade de vida de seus habitantes ao otimizar recursos e promover a sustentabilidade nas edificações. No Brasil, o governo tem fomentado diretrizes para impulsionar a adesão para este modelo, além de estabelecer decretos que promovam o uso da Modelagem da Informação da Construção (BIM) - um conjunto de processos e tecnologias para criar e gerenciar modelos digitais de construções durante todo o seu ciclo de vida [Brasil 2024].

Diante desse cenário, os gêmeos digitais concretizam o potencial do BIM por meio de um sensoriamento constante do ambiente. O presente trabalho implementa essa tecnologia no sistema de climatização do laboratório LaSDPC¹, localizado no Instituto de Ciências Matemáticas e Computação. Aliado a um crescente interesse de pesquisadores no desenvolvimento de soluções de gêmeos digitais [Crnogorac et al. 2025], compartilhamos *insights* práticos para futuras implementações, visando a integração de novos elementos para a construção de um gêmeo digital completo do laboratório utilizando tecnologias de uso livre. O objetivo é aprimorar a eficiência operacional do edifício, com foco em sua performance energética e conforto térmico.

2. Trabalhos Relacionados

Algumas abordagens exploram os gêmeos digitais sob contextos de edificações inteligentes, mas muitas delas dependem de recursos, o que limita sua aplicação a contextos específicos. Este trabalho, se diferencia ao focar na criação de uma solução que não só prioriza a interatividade do usuário, mas também demonstra a viabilidade de construir um sistema de um baixo custo.

O trabalho de [Robles et al. 2023] é um exemplo de abordagem robusta, que utiliza ferramentas de código aberto para a criação de gêmeos digitais. No entanto, sua aplicabilidade se limita a contextos industriais (indústrias petroquímicas), ignorando requisitos sociais e de interatividade para edifícios inteligentes. Nossa trabalho, ainda em andamento, busca preencher essa lacuna ao propor uma abordagem focada diretamente nessas demandas para a eficiência operacional do edifício.

O trabalho de [Shah et al. 2022] apresenta uma otimização térmica via gêmeo digital, utilizando ferramentas abertas e garantindo um custo acessível. Entretanto, a arquitetura proposta se limita a um problema de escopo reduzido. A complexidade inerente a edifícios inteligentes — com múltiplos sistemas e requisitos sociais — torna-se um desafio fundamental. Portanto, nossa pesquisa busca aplicar os mesmos princípios de custo e interatividade em uma escala e contexto mais abrangentes.

[Englezos et al. 2022], por exemplo, desenvolvem um gêmeo digital e uma plataforma de software para avaliação holística de desempenho. Apesar de sua contribuição para a qualidade do ambiente e eficiência energética, a solução adota o uso de ferramentas proprietárias, como o MATLAB, que pode vir a representar um obstáculo financeiro. Similarmente, [Rattanatamrong et al. 2022] propõe um protótipo de gêmeo digital para

¹<https://smart-lasdpc.github.io/>

um edifício acadêmico, integrando sensores e sistemas de gestão em uma arquitetura de nuvem e borda. A solução, embora viável, não prioriza a eficiência de custo, haja vista o uso de recursos nativos de uma nuvem pública. Em contraste, nosso trabalho busca superar essas limitações ao propor uma arquitetura de baixo custo que, diferente de ambos, evita a dependência de ferramentas proprietárias, tornando a solução mais acessível para uma adoção em larga escala em edifícios inteligentes.

Ainda sob o mesmo contexto, o trabalho descrito em [Masubuchi et al. 2025] busca resolver a limitação do acesso multiusuário ao integrar dados de sensores com uma plataforma de metaverso comercial, o *Cluster*. Embora inovador, essa dependência também faz uso de uma solução proprietária, levantando novamente questões sobre o custo e a ampla adoção.

Ao disponibilizar publicamente o protótipo, este estudo contribui para a democratização dos gêmeos digitais em instituições de ensino e pesquisa, oferecendo uma alternativa viável e escalável para monitoramento inteligente de edificações. A Tabela 1 sintetiza de forma comparativa os trabalhos relacionados.

Tabela 1. Comparação entre trabalhos relacionados

Trabalho	Edifícios Inteligentes	Código Livre	Interatividade
[Robles et al. 2023]	-	X	X
[Shah et al. 2022]	-	X	-
[Englezos et al. 2022]	X	-	X
[Rattanatamrong et al. 2022]	X	-	X
[Masubuchi et al. 2025]	X	-	X
Este trabalho	X	X	X

3. Arquitetura Proposta

A arquitetura proposta para o gêmeo digital tem por objetivo conectar o mundo físico ao virtual, usando uma abordagem em camadas para coletar, processar e visualizar dados em tempo real. Essa estrutura, ilustrada na Figura 1, é dividida em quatro camadas principais: dispositivos físicos, coleta de dados, abstração e processamento, e interface. A solução também integra ferramentas de código aberto em sua composição, aproveitando os benefícios de personalização de um software consolidado, assim como o apoio e manutenção de uma comunidade ativa, sem a necessidade de licenças.

3.1. Camada de Dispositivos Físicos

Responsável pela coleta de dados do ambiente físico, esta camada estabelece a conexão entre dispositivos físicos e o ambiente virtual por meio de serviços de mensageria baseados no protocolo MQTT. Os sensores — conectados a microcontroladores ESP32 — publicam dados de temperatura, umidade relativa e corrente, que são consumidos em etapas posteriores de abstração e pré-processamento. A escolha dos ESP32 se dá por sua versatilidade e suporte a conexões sem fio, uma solução eficaz e de baixo custo para a automação de edificações.

A aquisição de dados para a modelagem do gêmeo digital é baseada na simulação de sensores, o que facilita o desenvolvimento e a validação de funcionalidades. A arquitetura proposta, contudo, foi concebida para integrar dados de sensoriamento real de forma

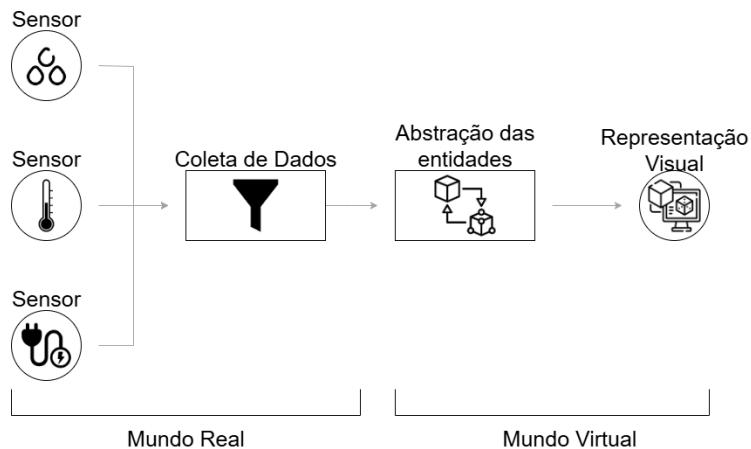


Figura 1. Arquitetura proposta

transparente, uma vez que a abstração do Ditto permite a troca da fonte de dados sem comprometer o sistema. Este projeto complementar já está em desenvolvimento e será discutido adiante.

3.2. Camada de Integração e Representação dos Dados

A camada de integração e representação dos dados desempenha um papel crucial na arquitetura, pois gerencia os aspectos representativos dos gêmeos digitais. Ela coleta e transforma informações brutas em uma representação digital coerente e estruturada, permitindo seu uso eficaz em processos de simulação, análise e tomada de decisões, além de garantir a interoperabilidade.

Para a representação digital, o Ditto utiliza um modelo de dados canônico baseado em JSON, onde cada dispositivo físico é uma entidade com metadados e funcionalidades. Para isso, basta descrever o sensor em uma notação JSON. Já para a comunicação, o Eclipse Mosquitto² atua como intermediário, empregando o protocolo MQTT para conectar dispositivos físicos às suas representações digitais de forma leve e com baixa latência.

3.3. Camada de Interface

A construção de gêmeos digitais tem explorado cada vez mais as capacidades de visualização e simulação em tempo real das *game engines*. Por isso, a camada de representação do nosso gêmeo digital utiliza o Unity³ como uma interface de interação e controle. Por meio dessa interface, o usuário não só visualiza o estado do sistema, mas também pode enviar comandos para os dispositivos físicos, que são refletidos na simulação. Complementarmente, conectamos o Unity³ ao Ditto através do protocolo WebSocket, que garante uma conexão bidirecional, persistente e de baixa latência, fundamental para a troca de dados e comandos em tempo real [Fongsamut et al. 2023].

Em síntese, a arquitetura em camadas proposta para o gêmeo digital, baseada em soluções de código aberto e de uso livre, oferece uma base flexível. Essa estrutura facilita a integração de novos sensores e fontes de dados, além de permitir adaptações a futuras demandas de monitoramento e análise. Com isso, busca-se não apenas uma representação

²<https://mosquitto.org/>

³<https://learn.unity.com/tutorial/introduction-to-digital-twins-with-unity>

fiel do ambiente físico, mas também a geração de *insights* relevantes para a tomada de decisão.

4. Resultados Preliminares

A validade e a aplicabilidade desta arquitetura já estão sendo testadas por meio do desenvolvimento de um protótipo aplicado ao LaSDPC. Este exemplar inicial implementa as principais camadas propostas, estabelecendo um alicerce para a futura arquitetura planejada, indicada na Figura 2.

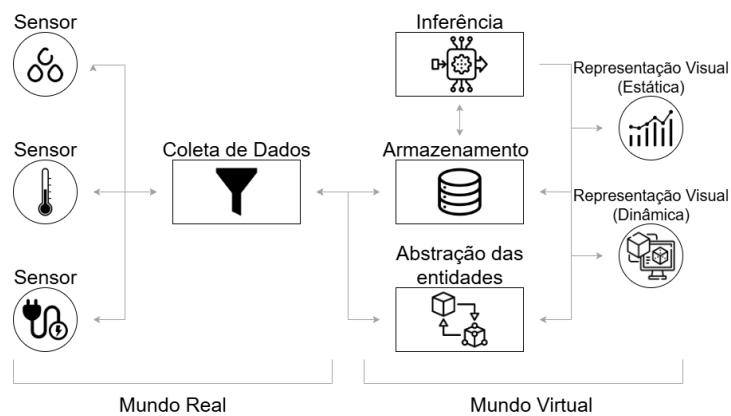
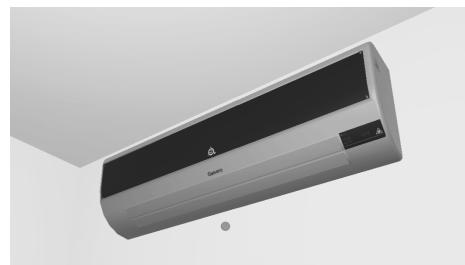


Figura 2. Arquitetura em seu estágio final.

A Figura 3b apresenta a réplica mapeada do ar-condicionado real, disposto na Figura 3a. A plataforma responde de maneira reativa às variações captadas pelos sensores e promove uma experiência mais imersiva, alinhada aos objetivos do gêmeo digital.



(a) Ar Condicionado do LaSDPC



(b) Ar Condicionado mapeado para o Unity©

Figura 3. Ar condicionado no mundo real e no mundo virtual

Atualmente, o protótipo desenvolvido possui a capacidade de coletar dados de temperatura provenientes de sensores baseados na plataforma ESP32, os quais são ingeridos na plataforma Ditto para posterior visualização. Os dados são apresentados por meio de um dashboard interativo implementado em React, bem como por uma interface imersiva desenvolvida com o motor gráfico Unity©. Adicionalmente, uma versão acessível deste protótipo, que interage com sensores simulados, encontra-se disponível na infraestrutura do LaSDPC, o Andromeda: <http://andromeda.lasdpc.icmc.usp.br:61101/digitaltwin/>

5. Conclusão e Trabalhos Futuros

Este artigo apresentou a arquitetura e a implementação inicial de um gêmeo digital para edificações inteligentes. Discutimos a estratégia de camadas, que integra dispositivos físicos com soluções *open source* para representação de dados, culminando em uma interface web interativa, cuja viabilidade foi demonstrada através de um protótipo funcional e acessível. Embora o trabalho esteja em andamento, os resultados preliminares e a arquitetura proposta solidificam as bases para um sistema de monitoramento e análise de dados. Como trabalhos futuros, planejamos expandir as funcionalidades do gêmeo digital, integrando BIM e mecanismos de IA. O objetivo é criar uma representação digital mais abrangente e precisa, capaz de auxiliar na análise preditiva, detecção de anomalias e tomada de decisões.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro recebido da FAPESP (número #20/09770-7 e #21/06968-3) e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Referências

- Brasil (2024). Decreto nº 11.888: Estratégia nacional de disseminação do building information modelling no brasil.
- Crnogorac, J., Kočan, E., and PejanovićĐurišić, M. (2025). Maturity of open-source digital twin platforms in iot. *2025 29th International Conference on Information Technology (IT)*, 00:1–5.
- Englezos, D., Hadjidemetriou, L., Papadopoulos, P., Timotheou, S., Polycarpou, M., and Panayiotou, C. (2022). A digital twin architecture for smart buildings. *2022 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2)*, 00:1–7.
- Fongsamut, C., Kanangnanon, T., Jantarakongkul, B., and Jitngernmadan, P. (2023). Digital twin in automation industry: Optimal communication protocol. In *2023 7th International Conference on Information Technology (InCIT)*, pages 33–37.
- Masubuchi, Y., Hiraki, T., Hiroi, Y., Ibara, M., Matsutani, K., Zaizen, M., and Morita, J. (2025). Development of digital twin environment through integration of commercial metaverse platform and iot sensors of smart building. *2025 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW)*, 00:852–855.
- Rattanatamrong, P., Srisawat, J., Boonchoo, T., and Haga, J. (2022). Development of a digital twin for smart building over edge-cloud continuum. *2022 IEEE 8th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, 00:1–6.
- Robles, J., Martín, C., and Díaz, M. (2023). OpenTwins: An open-source framework for the development of next-gen compositional digital twins. *Computers in Industry*, 152:104007.
- Shah, K., Prabhakar, T. V., R, S. C., V, A. S., T, V. K., and Shah, K. (2022). Construction of a digital twin framework using free and open-source software programs. *IEEE Internet Computing*, 26(5):50–59.
- VanDerHorn, E. and Mahadevan, S. (2021). Digital twin: Generalization, characterization and implementation. *Decision Support Systems*, 145:113524.