



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS (UFG)  
FACULDADE DE ARTES VISUAIS (FAV)  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PROJETO E CIDADE

SARAH YASMIN PEREIRA MARQUES

**GÊMEOS DIGITAIS, INTERNET DAS COISAS E O AMBIENTE**  
**CONSTRUÍDO : Um Protótipo**

GOIÂNIA  
2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
FACULDADE DE ARTES VISUAIS

## TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES

### E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

#### 1. Identificação do material bibliográfico

Dissertação  Tese  Outro\*: \_\_\_\_\_

\*No caso de mestrado/doutorado profissional, indique o formato do Trabalho de Conclusão de Curso, permitido no documento de área, correspondente ao programa de pós-graduação, orientado pela legislação vigente da CAPES.

Exemplos: Estudo de caso ou Revisão sistemática ou outros formatos.

#### 2. Nome completo do autor

Sarah Yasmin Pereira Marques

#### 3. Título do trabalho

GÊMEOS DIGITAIS, INTERNET DAS COISAS E O AMBIENTE CONSTRUÍDO : Um Protótipo

#### 4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento  SIM  NÃO<sup>1</sup>

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

- a) consulta ao(à) autor(a) e ao(à) orientador(a);
  - b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.
- O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

**Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.**



Documento assinado eletronicamente por **Pedro Henrique Goncalves, Professor do Magistério Superior**, em 26/08/2025, às 09:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Sarah Yasmin Pereira Marques, Discente**, em 26/08/2025, às 09:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **5602251** e o código CRC **CEAD5576**.

Referência: Processo nº 23070.033795/2025-71

SEI nº 5602251

SARAH YASMIN PEREIRA MARQUES

**GÊMEOS DIGITAIS, INTERNET DAS COISAS E O AMBIENTE  
CONSTRUÍDO : Um Protótipo**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Projeto e Cidade, da Faculdade de Artes Visuais da Universidade Federal de Goiás, como requisito para a obtenção do título de Mestra em Projeto e Cidade.

Área de concentração: Projeto, Teoria, História e Crítica.

Linha de pesquisa: Processos e Tecnologias de Projeto e Planejamento.

Orientador: Professor Doutor Pedro Henrique Gonçalves.

GOIÂNIA

2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Marques, Sarah Yasmin Pereira  
GÊMEOS DIGITAIS, INTERNET DAS COISAS E O AMBIENTE  
CONSTRUÍDO : Um Protótipo [manuscrito] / Sarah Yasmin Pereira  
Marques. - 2025.  
cvii, 107 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Henrique Gonçalves.  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás,  
Faculdade de Artes Visuais (FAV), Programa de Pós-graduação em  
Projeto e Cidade, Goiânia, 2025.

Bibliografia.

Inclui siglas, fotografias, abreviaturas, gráfico, lista de figuras.

1. Gêmeos Digitais. 2. Internet das Coisas (IoT). 3. Construção Civil. 4. Prototipagem. 5. Modelo Digital. I. Gonçalves, Pedro Henrique, orient. II. Título.

CDU 72



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
FACULDADE DE ARTES VISUAIS  
ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata nº 008/2025 da sessão de Defesa de Dissertação de Sarah Yasmin Pereira Marques, que confere o título de Mestre(a) em Projeto e Cidade, na área de concentração em **Projeto, Teoria, História e Crítica**.

Ao/s **trinta de junho de dois mil e vinte e cinco**, a partir da(s) **quinze horas**, através de **webconferência**, realizou-se a sessão pública de Defesa de Dissertação intitulada **“GÊMEOS DIGITAIS, INTERNET DAS COISAS E O AMBIENTE CONSTRUÍDO : Um Protótipo”**. Os trabalhos foram instalados pelo(a) Orientador(a), Professor(a) Doutor(a) **Pedro Henrique Gonçalves (PPGPROCIDADE/FAV/UFG)** com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professor(a) Doutor(a) **Clarissa Sartori Ziebell (UFRGS)**, membro titular externo; Professor(a) Doutor(a) **Fabiolla Xavier Rocha Ferreira Lima (PPGPROCIDADE/UFG)**, membro titular interno. Durante a arguição os membros da banca **não fizeram** sugestão de alteração do título do trabalho. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação, tendo sido(a) o(a) candidato(a) **aprovado(a)** pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo(a) Professor(a) Doutor(a) **Pedro Henrique Gonçalves (FAV/UFG)**, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, ao(s) **trinta de junho de dois mil e vinte e cinco**.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA



Documento assinado eletronicamente por **Pedro Henrique Gonçalves, Professor do Magistério Superior**, em 26/08/2025, às 09:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fabiolla Xavier Rocha Ferreira Lima, Professora do Magistério Superior**, em 26/08/2025, às 16:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Clarissa Sartori Ziebell, Usuário Externo**, em 26/08/2025, às 16:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **5602245** e o código CRC **6BF6111D**.

Referência: Processo nº 23070.033795/2025-71

SEI nº 5602245

## RESUMO

Com o advento dos avanços computacionais, as ferramentas físicas, utilizadas no campo da Arquitetura e do Urbanismo, foram ampliadas para os ambientes digitais. Indo além da visão de representação digital com foco na compreensão de projetos, ao longo do tempo, as representações em forma de modelos tridimensionais foram vislumbradas como uma fonte para armazenar informações com mais detalhes. A Internet das Coisas (IoT) gerou novas possibilidades na coleta e na transmissão de dados de modo automático, mostrando-se como uma possível aliada no campo da construção civil para se obter mais dados a serem convertidos em informações a partir de análises para tomada de decisões. Um conceito que alinha a transmissão de dados/informações entre o meio físico e modelos digitais ficou conhecido como Gêmeo Digital (GD). No ambiente construído, a adoção do conceito de GDs apresenta traços mais recentes, na compreensão mais profunda de seu impacto nos projetos, além da gestão das edificações, processo esse que ainda está sendo explorado. Nesta pesquisa, é apresentado um protótipo de brise dinâmico na escala de 1:5 como elemento arquitetônico que visa exemplificar, de forma genérica, uma integração físico-digital por meio da leitura de sensores representados no meio virtual. Foram produzidos três dispositivos de monitoramento e definidos três cenários de observação: sem o brise, com o brise fixo e com brise dinâmico. O intuito não foi realizar uma análise de conforto ambiental, mas avaliar o funcionamento do sistema. O resultado do protótipo demonstrou a viabilidade da integração físico-digital atendendo ao propósito, além de se observar, na literatura, o uso dos GDs nos processos de gestão no ambiente construído e as ferramentas que vêm sendo empregues em estudos de caso.

Palavras-chave: Gêmeos Digitais, Internet das Coisas (IoT), Construção Civil, Prototipagem, Modelo Digital.

## **ABSTRACT**

With the advent of computational advances, the physical tools used in the fields of Architecture and Urban Planning were expanded to digital environments. Going beyond the vision of digital representation focused on understanding projects, over time, representations in the form of three-dimensional models were envisioned as a source for storing more detailed information. The Internet of Things (IoT) created new possibilities for the automatic collection and transmission of data, proving to be a potential ally in the construction industry for obtaining more data to be converted into information based on analysis for decision-making. A concept that aligns the transmission of data/information between the physical environment and digital models became known as Digital Twin (DG). In the built environment, the adoption of the DG concept presents more recent features, with a deeper understanding of its impact on projects and building management, a process that is still being explored. This research presents a 1:5 scale dynamic louver prototype as an architectural element that aims to generically exemplify physical-digital integration through the reading of sensors represented in the virtual environment. Three monitoring devices were produced, and three observation scenarios were defined: without the louver, with a fixed louver, and with a dynamic louver. The objective was not to perform an environmental comfort analysis, but rather to evaluate the system's functionality. The prototype's results demonstrated the feasibility of physical-digital integration, meeting the purpose. The literature also highlights the use of digital twins in management processes in the built environment and the tools being employed in case studies.

Keywords: Digital Twins, Internet of Things (IoT), Civil Construction, Prototyping, Digital Model.

## **AGRADECIMENTOS**

Fui agraciada com a oportunidade de conhecer e partilhar experiências com pessoas incríveis ao longo dos últimos anos. Nesta dissertação gostaria de agradecer ...

A Deus, por guiar meus passos e demonstrar Seu cuidado e amor em cada etapa da minha jornada.

Ao meu orientador e mentor professor Dr. Pedro Henrique Gonçalves, pela dedicação, paciência e orientação valiosa, além da gentileza constante ao longo desta dissertação e de toda minha trajetória acadêmica.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG), pelo apoio financeiro por meio da concessão de bolsa de estudos, processo nº 202310267000710.

Aos meus pais Elvira e Walmo e a minha irmã Isadora, que com carinho, paciência e dedicação me acompanharam nessa caminhada, sendo minha base e meu porto seguro.

À Universidade Federal de Goiás por proporcionar o ambiente propício para a realização deste estudo.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação por suas contribuições ao longo das disciplinas.

Aos professores Dra. Fabíolla Xavier Ferreira Rocha Lima e Dr. Gustavo Teodoro Laureano, pela dedicação à leitura e pelas contribuições valiosas para o aprimoramento desta pesquisa.

Aos membros da banca examinadora, a professora Dra. Fabíolla Xavier Ferreira Rocha Lima, professora Dra. Clarissa Sartori Ziebell, professora Dra. Luana Miranda Esper Kallas e Dra. Sandra Schmitt Soster, pelo aceite e pelas contribuições oferecidas.

Ao professor Dr. Wagner de Souza Rezende pelo apoio e pelas indicações de leitura.

A Ruitter Resende e Rafael Argôlo, pelo suporte prestado na secretaria durante o mestrado.

A Pedro Schaitl Souza, pelo apoio neste trabalho e pela colaboração prestada em momentos anteriores.

Aos meus colegas do programa de pós-graduação, Ma. Letícia, Ítalo, Ana Vitória, Vitória, Gabriel e Fátima pela companhia ao longo dessa jornada, e a Vinícius, pelas valiosas indicações.

À família ICMA, cujo apoio genuíno torna esta jornada ainda mais especial.

A Denise Coimbra, pelo apoio.

Ao Me. Rodrigo Gouvea Rodrigues, pelo apoio.

A todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para o meu processo de aprendizado.

Com gratidão.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo do fluxo de dados do Modelo Digital, da Sombra Digital e do Gêmeo Digital.....	24
Figura 2 – “O fogo do tamanho de uma vela é detectado e instantaneamente exibido no modelo de visualização 3D do gêmeo digital” (Khajavi <i>et al.</i> , 2023, p. 52347, tradução nossa).....	31
Figura 3 – Exemplo trazido por Lee <i>et al.</i> (2022), um modelo 3D de um veículo no ambiente digital, capaz de reproduzir os movimentos de sua contraparte no mundo físico.....	33
Figura 4 – Ambiente de estudo do caso 1 - sem o Brise.....	37
Figura 5 – Componentes de hardware.....	38
Figura 6 – Um dos dispositivos de monitoramento.....	38
Figura 7 – Protocolos do experimento no ambiente de estudo do caso 3.....	40
Figura 8 – Partes do Brise e suporte do micro servo, modelados digitalmente no <i>software</i> Blender.....	41
Figura 9 – Modelo digital versão final do Brise, desenvolvido no <i>software</i> Blender.....	41
Figura 10 – Impressão de peças do Brise com a tecnologia de Manufatura Aditiva.....	42
Figura 11 – Etapas realizadas até a impressão.....	42
Figura 12 – Procedimentos metodológicos.....	44
Figura 13 – “As fases do ciclo de vida do edifício e o impacto do gêmeo digital sobre elas, juntamente com a interação dinâmica entre essas fases nos domínios digital e físico” (Khajavi <i>et al.</i> , 2023, p. 52347, tradução nossa).....	47
Figura 14 – Brise vinculado ao micro servo motor.....	68
Figura 15 – A esquerda peças produzidas em MDF e PLA, a direita em APEX Carbono.....	69
Figura 16 – Dispositivo número 3 colocado sobre um suporte.....	70
Figura 17 – Posição dos ambientes de estudo de caso sobre a cobertura de telha cerâmica.....	70
Figura 18 – Indicação da posição e dos dados coletados em cada dispositivo.....	71
Figura 19 –Dados coletados de sensor de luminosidade no ambiente de estudo do caso 1.....	71

Figura 20 - Dados coletados pelo sensor de temperatura no ambiente de estudo do caso 1.....	72
Figura 21 - Dados coletados pelo sensor de umidade no ambiente de estudo do caso 1. ....	72
Figura 22 – Dados coletados pelo sensor de luminosidade no ambiente de estudo do caso 2.....	74
Figura 23 – Dados coletados pelo sensor de temperatura no ambiente de estudo do caso 2.....	75
Figura 24 –Dados coletados pelo sensor de umidade no ambiente de estudo do caso 2. ....	75
Figura 25 – Fluxo de dados dos sensores e atuador no ambiente de estudo do caso 3 .....	77
Figura 26 - Dados coletados pelo sensor de luminosidade no ambiente de estudo do caso 3.....	78
Figura 27 - Dados coletados pelo sensor de temperatura no ambiente de estudo do caso 3.....	78
Figura 28- Dados coletados pelo sensor de umidade no ambiente de estudo do caso 3. ....	78
Figura 29 – Modelo digital na Unity texturizado.....	82
Figura 30 – Fluxo de dados e tópicos das mensagens enviadas via protocolo MQTT. ....	83
Figura 31 – Verificação do recebimento de dados (Iluminação e ângulo).....	84
Figura 32 – Na cor laranja há a indicação de localização dos pivôs nos eixos de rotação. ....	85
Figura 33 – Protótipo digital com os dados de iluminação e ângulo plotados em "tempo real".....	85
Figura 34 – Dados de temperatura e umidade coletados em “tempo real” no ambiente do estudo de caso 3. ....	86
Figura 35 – Código QR para acesso ao vídeo do protótipo digital em funcionamento. ....	86

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Disparidades entre GD e BIM. ....	26
Quadro 2 - Ferramentas utilizadas no desenvolvimento de GDs, com indicação dos autores e país de vínculo institucional.....	52
Quadro 3 - Ferramentas comerciais mencionadas por Cespedes-Cubides e Jradi (2024).....	58
Quadro 4 - Ferramentas mencionadas por Sharifi <i>et al.</i> (2024) sobre o GD de Helsinki (Finlândia). ....	61
Quadro 5 – Ferramentas para produção de Modelos 3D em Riaz, McAfee e Gharbia (2023).....	61
Quadro 6- Ferramentas para Gêmeos Digitais em Riaz, McAfee e Gharbia (2023). ....	62
Quadro 7 - Licenciamento dos <i>softwares</i> utilizados nos estudos de caso ou mencionados.....	64
Quadro 8 - Status da coleta e transmissão de dados no ambiente de estudo do caso 1.....	72
Quadro 9 - Status da coleta e transmissão de dados do ambiente de estudo do caso 2.....	75
Quadro 10 - Status da Coleta e Transmissão de Dados no ambiente do estudo de caso 3.....	79
Quadro 11 – Valores máximos de temperatura e iluminação coletados. ....	81

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AEC	Arquitetura, Engenharia e Construção
AM	Aprendizado de Máquina
BIM	<i>Building Information Modelling</i>
CCTV	<i>Closed-Circuit Television</i>
CPS	<i>Cyber-Physical System</i>
DT	Design Thinking
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i>
GD	Gêmeo Digital
GDs	Gêmeos Digitais
GIS	<i>Geographic Information System</i>
HBIM	<i>Heritage Building Information Modeling</i>
HTTP	<i>Hypertext Transfer Protocol</i>
IA	Inteligência Artificial
IoT	Internet das Coisas
LED	<i>Light-Emitting Diodes</i>
LiDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
M2M	<i>Machine to Machine</i>
MA	Manufatura Aditiva
MD	Modelo Digital
MDF	<i>Medium Density Fiberboard</i>
MQTT	<i>Message Queuing Telemetry Transport</i>
PLA	Ácido Polilático
RA	Realidade Aumentada
RDBMS	<i>Relational Database Management System</i>
RV	Realidade Virtual
SHM	<i>Structural Health Monitoring</i>
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
1.1	Contextualização.....	17
1.2	Problema de Pesquisa .....	18
1.3	Objetivos .....	18
1.4	Justificativa .....	18
1.5	Estrutura da Dissertação.....	19
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO.....</b>	<b>20</b>
2.1	Internet das Coisas .....	20
2.2	Gêmeos Digitais na Arquitetura .....	23
2.2.1	Gêmeos Digitais e a sinergia entre as tecnologias .....	27
2.2.2	Explorando as aplicações de Gêmeos Digitais no ambiente construído: Visão global e perspectivas brasileiras. ....	29
<b>3</b>	<b>PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....</b>	<b>34</b>
3.1	Classificação e Método da Pesquisa .....	35
3.2	Revisão da Literatura .....	35
3.3	Estruturação da Pesquisa com o <i>Design Thinking</i> .....	35
a)	Empatia/Entender .....	35
b)	Definir.....	36
c)	Ideação .....	36
d)	Protótipo.....	36
e)	Testar.....	36
f)	Avaliação da implementação .....	36
3.4	Ambientes dos estudos de caso .....	36
3.5	Percepção: Sensores e Atuadores.....	37
3.5.1	Monitoramento .....	39
3.5.2	Rede .....	39
3.6	Os Protótipos <i>do</i> Brise .....	40

3.6.1	Modelo Digital .....	40
3.6.2	Projeto e Materiais .....	41
3.7	O Protótipo Digital .....	43
3.8	Avaliação .....	44
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>44</b>
4.1	Revisão da Literatura .....	44
4.1.1	Influência dos Gêmeos Digitais nos processos de Gestão no ambiente construído .....	45
4.1.2	Ferramentas.....	51
4.2	O Experimento .....	68
4.2.1	Produção dos Brises.....	68
4.2.2	Monitoramento .....	69
a)	Dispositivo do ambiente de estudo do caso 1 .....	71
b)	Dispositivo do ambiente de estudo do caso 2 .....	74
c)	Dispositivo do ambiente do estudo de caso 3 .....	77
4.2.3	Gêmeo Digital .....	82
4.3	Discussão .....	87
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>92</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>94</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

Os computadores foram introduzidos no cotidiano de muitas pessoas no fim dos anos 1980 (Venkatesh, 1996). A nomenclatura, Tecnologias da Informação e Comunicação surge em 1990 (Machado, 2016), e foi nessa mesma década que as tecnologias digitais se tornaram mais visadas nas práticas de ensino de Arquitetura e Design, o que guiaria para o uso frequente de uma dessas tecnologias, o *Computer Aided Design* (CAD) (Reffat, 2007).

Diversos avanços tecnológicos e conceitos foram surgindo ao longo dos anos subsequentes. Em um mundo cada vez mais conectado à internet, o “volume e a heterogeneidade de dados produzidos diariamente por uma sociedade digitalmente transformada são bastante elevados [...]” (Nativi; Mazzetti; Craglia, 2021, p. 3, tradução nossa). Nas últimas décadas, soluções comerciais de objetos “inteligentes”<sup>1</sup> integrados à internet têm sido desenvolvidas e incorporadas aos ambientes residenciais.

As tecnologias podem influenciar de diferentes formas o cotidiano das pessoas. Por exemplo, em cidades, os semáforos controlam o tempo e o fluxo de veículos nas vias. Uma rota inicialmente planejada pode ser persuadida pelas informações de tráfego expostas em serviços *web* como aplicativos, antes, durante e após o deslocamento. Em 2020, o artista Simon Wreckert<sup>2</sup> usando um carrinho que continha cerca de noventa e nove dispositivos móveis com acesso a um aplicativo, induziu a indicação de um congestionamento em uma das ruas de Berlim. Dessa forma, foi possível observar uma redução muito significativa na circulação de veículos no local (Tanji, 2020).

De acordo com Mohammed *et al.* (2022, p. 74508, tradução nossa), o setor da construção está notando os progressos e benefícios da inclusão de uma gama de tecnologias como “Inteligência Artificial (IA), computação em nuvem, ontologias,

---

<sup>1</sup> “[...] a inteligência não se resume a meros algoritmos e cálculos, mas sim um fenômeno complexo e dinâmico, emergente da interação de bilhões de neurônios em um ambiente em constante transformação” (Nicoletis, 2020 *apud* Silva; Paniago, 2025, p. 3, tradução nossa).

<sup>2</sup> Simon Wreckert é um artista e designer alemão, que desenvolve trabalhos com temáticas direcionadas à tecnologia, sociedade e arte (Node Forum, s. d.). A experiência descrita no texto pode ser visualizada em seu web site: <https://www.simonweckert.com/googlemapshacks.html>. Acesso em 20 jun. 2025.

Blockchains, análise de dados, Internet das Coisas (IoT), digitalização a laser e Aprendizado de Máquina (AM)”. Os dados se tornaram um mecanismo importante e podem promover a melhoria na gestão de recursos.

## 1.2 Problema de Pesquisa

Os impactos do desenvolvimento técnico científico no campo da Arquitetura e Urbanismo, integrado a tecnologias como a Internet das Coisas (IoT) e Gêmeos Digitais (GDs), têm direcionado a aplicação de novos processos e técnicas, que podem trazer melhorias no planejamento e eficiência na gestão das edificações (Fialho *et al.*, 2022; Sharifi *et al.*, 2024; White *et al.*, 2021; Zhao *et al.*, 2021).

O uso do conceito de GDs, ao longo dos últimos anos, vem crescendo nas produções científicas no âmbito internacional, e como muitos dos estudos são mais recentes, há algumas divergências e lacunas de pesquisa. A pergunta que direciona esta pesquisa é: como os Gêmeos Digitais podem influenciar nos processos de gestão nas edificações? Com essa pergunta inicial, partisse da hipótese que a combinação de IoT e GDs proporciona um ambiente de construção inteligente, onde o monitoramento contínuo, a análise detalhada e a capacidade de simulação e previsão trabalham juntas para melhorar o desempenho ambiental em edificações.

## 1.3 Objetivos

O objetivo desta pesquisa é desenvolver um protótipo de um brise de cunho experimental para validar a integração físico-digital por meio da leitura de sensores físicos representados no meio virtual. Como objetivo específico, o trabalho busca: Compreender o panorama das ferramentas utilizadas em estudos de caso para produção de GDs, a fim facilitar a identificação de plataformas com potencial de uso para gestão e monitoramento de edificações; utilizar ferramentas de baixo custo ou gratuitas para realizar o monitoramento do protótipo.

## 1.4 Justificativa

O uso das tecnologias digitais expandiu os horizontes de investigação em diversas áreas do conhecimento. As representações digitais foram adotadas como facilitadoras

na comunicação de projetos, registros, além de arquivos primordiais para a reprodução de objetos. Com as tecnologias de realidades estendidas (realidade aumentada, virtual e mista) torna-se possível sobrepor conteúdos digitais ao ambiente físico ou até mesmo adentrar ambientes virtuais. Diversos sensores podem ser empregados na coleta de dados não apenas para subsidiar o desenvolvimento de modelos digitais, mas como base essencial para as análises que possibilitam antever a resolução de situações que demandem custos elevados. O universo de criação e aprimoramento de ferramentas digitais faz com que profissionais busquem conhecer essas tecnologias com intuito de potencializar o fluxo de trabalho e a tomada de decisão.

Na literatura há diferentes tipos de brises automatizados, a intensão desta pesquisa não é apontar qual modelo de brise é mais eficiente ou realizar análises de conforto ambiental, mas trazer um exemplo genérico na replicação digital de um elemento do ambiente construído. A justificativa para o entendimento de *softwares/ferramentas* que estão sendo adotados se dá pela ausência de padronização dos métodos de desenvolvimento de GDs, em decorrência dos diferentes contextos de aplicação, além do movimento crescente de pesquisas práticas direcionadas ao conceito de GDs, há menos de uma década, onde espera-se possibilitar um direcionamento para que pesquisadores avaliem seu uso em projetos.

### 1.5 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação foi desenvolvida no Programa de Pós-Graduação em Projeto e Cidade da Universidade Federal de Goiás (UFG). Após esta introdução, a pesquisa está estruturada em mais quatro capítulos, sendo: 2) Fundamentação: aborda os temas de Internet das Coisas e Gêmeos Digitais ao apresentar o que são os conceitos e exemplos de sua aplicação no ambiente construído; 3) Procedimentos metodológicos: apresenta os procedimentos adotados no experimento, trazendo as etapas de desenvolvimento, recursos e as ferramentas que foram empregadas durante a pesquisa; 4) Resultados e discussões: expõe os resultados do experimento, em especial no que diz respeito ao termo Gêmeos Digitais na área de gestão e nas ferramentas que estão sendo adotadas na produção de GDs; E por fim as Considerações Finais e Trabalhos Futuros focam em uma breve recapitulação dos

principais pontos abordados no estudo com base nas percepções dos resultados da pesquisa e trazem os encaminhamentos futuros.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO

### 2.1 Internet das Coisas

O conceito de Internet das Coisas (*Internet of Things* – IoT) trouxe o fortalecimento de outras formas de vislumbrar a coleta de dados contrapondo as extrações manuais de dados (Ashton, 2009). A viabilização e a expansão da IoT foram geradas pelos diversos avanços tecnológicos que permitiram o desenvolvimento de sistemas embarcados, de conectividade, processamento e análise, cada vez mais consolidados (Sturm; Pollard; Craig, 2017).

De acordo com Santos *et al.* (2016), a ideia da Internet das Coisas se concentra na possibilidade de que objetos com recursos computacionais sejam capazes de coletar e transferir dados. O princípio conceitual da IoT está ligado a uma apresentação realizada em 1999 por Kevin Ashton, sendo direcionada a uma corporação, e tendo como foco a radiofrequência na cadeia de suprimentos (Ashton, 2009).

As arquiteturas IoT são variadas de acordo com a vertente de suas aplicações. Para Nikoui *et al.* (2020), um modelo base encontra-se dividido em três camadas. A primeira, de percepção, está integrada de modo direto com o ambiente, valendo-se de sensores para coletar dados e atuadores para realizar ações de controle (Donno; Tange; Dragoni, 2019; Nikoui *et al.*, 2020; Taivalsaari; Mikkonen, 2015). A segunda é a de rede, viabilizando que os dados da camada de percepção sejam transferidos (Donno; Tange; Dragoni, 2019). Já na camada de aplicação, os dados coletados serão recebidos, contendo a interface de interação com o usuário (Allam *et al.*, 2022; Donno; Tange; Dragoni, 2019). Outros tipos de paradigmas computacionais modernos também podem ser encontrados nas arquiteturas IoT como: *Cloud, Edge, Fog* (Donno; Tange; Dragoni, 2019).

O vislumbre de incorporação da IoT vem perpassando as mais diversas áreas e, ao encontrar os espaços construídos nessa tecnologia, aparece a ideia de ambientes e cidades “inteligentes”. De acordo com Moser, Harder e Koo (2014), uma gama de sensores pode ser utilizada na coleta de dados, e esses objetos inteligentes, ao se

conectarem com a internet, permitem o monitoramento, a análise e as ações de manipulação sobre os ambientes.

Venkatesh (1996) descreve que as tecnologias da informação começaram a adentrar as residências nos anos 1980, se integrando às rotinas diárias de seus moradores. A princípio os sistemas eram automatizados (1980s - 2000), e, com o passar dos anos a conectividade com a internet guiou para perspectiva de sistemas “inteligentes” (Hu, 2021). Moser, Harder e Koo (2014) expõem diversos exemplos de possíveis aplicações em rotinas nas casas inteligentes, entendendo que uma das grandes vantagens da IoT nos tipos de usos é a análise do consumo de energia e água, além de proporcionar conforto para os habitantes. Chan *et al.* (2008) entendem que a adoção de sistemas “inteligentes” nas residências pode trazer melhorias na qualidade de vida dos idosos e pessoas com deficiência ao proporcionar mais autonomia no desenvolvimento de suas atividades de rotina, além de prever situações de risco.

A interação com os sistemas “inteligentes” acontece não somente por meio de telas, mas por voz. As assistentes virtuais fazem parte do ecossistema de casas inteligentes. Elas possuem a capacidade de interagir via diálogos de linguagem natural, e recebem diferentes nomes como *Alexa* (Amazon), *Bixby* (Samsung) e *Google Home* (Google), sendo comercializadas de modo isolado ou em conjunto com dispositivos (tomadas, lâmpadas, dentre outros) (Jaddoh *et al.*, 2025).

O monitoramento com IoT é uma estratégia relevante para compreender o *status* mais recente em edificações e cidades. A título de exemplo, no monitoramento estrutural, De Angelis *et al.* (2020) apresentam um sistema IoT de baixo custo desenvolvido e testado em um laboratório, um sítio arqueológico e um museu, que demonstrou funcionamento adequado, permitindo a identificação de situações de risco.

Em uma escala mais ampla, Gribaudo, Iacono e Levis (2017) trazem um estudo de caso para a cidade de Matera, patrimônio cultural italiano, se baseando em dois cenários. O primeiro, em condições cotidianas, e o segundo simulando uma situação imprevista (um assalto de um bem patrimonial). Os autores mapearam as possíveis rotas de fluxo no local por meio de um modelo com agentes (*Markovian*), e a IoT

aumentou significativamente a probabilidade de êxito na captura dos ladrões e na recuperação da obra (Gribaudo; Iacono; Levis, 2017).

O monitoramento para o gerenciamento de museus é apresentado em Varma, Chauhan e Yafi (2021) no protótipo ARTYCUL, câmeras fazem parte de sistema que permite maior privacidade aos visitantes e não necessita ser acessado por dispositivos móveis como utilizado em outras pesquisas com IoT; técnicas de Aprendizagem de Máquina são incorporadas ao estudo para detectar figuras humanas e realizar o planejamento e a organização dos acervos, obtendo informações sobre aglomerações, horários de intensidade de visitação, o que melhora o fluxo no ambiente e a visualização das obras (Varma; Chauhan; Yafi, 2021).

No contexto urbano, a IoT recebeu visibilidade agregada ao conceito de cidades inteligentes. Segundo Pinochet *et al.* (2018), o mesmo surgiu na década de 1990, diante do cenário de migração para áreas urbanas, propondo a integração de sistemas que permitissem otimizar serviços com recursos tecnológicos para melhorar a qualidade de vida. As cidades inteligentes são definidas pela norma ABNT NBR ISSO 37122:2020 como:

“[...] cidade que aumenta o ritmo em que proporciona resultados de sustentabilidade social, econômica e ambiental e que responde a desafios como mudanças climáticas, rápido crescimento populacional e instabilidades de ordem política e econômica, melhorando fundamentalmente a forma como engaja a sociedade, aplica métodos de liderança colaborativa, trabalha por meio de disciplinas e sistemas municipais, e usa informações de dados e tecnologias modernas, para fornecer melhores serviços e qualidade de vida para os que nela habitam (residentes, empresas, visitantes), agora e no futuro previsível, sem desvantagens injustas ou degradação do ambiente natural” (ABNT, 2020, p. 2).

A Internet das Coisas é uma dessas “tecnologias modernas” que é visada para melhoria de serviços. Exemplos práticos nas cidades brasileiras podem ser observados na Cartilha da Cidades (BNDES, 2018). Essas aplicações estão localizadas nas regiões Nordeste, Sudeste e Sul, sendo direcionadas a ações de mobilidade urbana, segurança, coleta de resíduos, monitoramento ambiental, entre outras (BNDE, 2018).

O documento Estratégia Brasileira para a Transformação Digital (E-Digital) teve sua primeira versão pública em 2018. Uma das áreas em que a IoT marcou presença na E-Digital foi direcionada ao contexto das cidades inteligentes (Brasil, 2018). A E-Digital está baseado sobre dois eixos temáticos principais: Eixos Habilitadores e os

Eixos de Transformação Digital, tendo sua nova versão de revisão para o ciclo de 2022 a 2026, que mantem o objetivo e as estratégias da E-Digital 2018 (Brasil, 2022). Como um dos resultados das ações do ciclo 2018 – 2022, a atualização cita o Plano Nacional de Internet das Coisas (Decreto n. 9.854) publicado em junho de 2019, que abrange 43% das metas dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). As cidades são um dos focos de ações prioritárias do plano nacional da IoT que contempla os seguintes objetivos (Brasil, 2022, p. 67-68):

reduzir os tempos de deslocamento, considerando as diferentes modalidades de veículos, e aumentar o interesse pelo transporte público;  
aumentar a capacidade de vigilância e monitoramento, com vistas à segurança pública;  
reduzir o desperdício de energia, criando uma rede de iluminação pública com soluções inteligentes baseadas na IoT.

A E-Digital também abarca a expansão da difusão da Internet no país. Essas iniciativas tornam-se relevantes para aumentar as possibilidades de desenvolvimento de projetos IoT que demandam melhorias significativas como os propiciados pelas redes 5G. Os recursos implementados nessas novas gerações de redes podem trazer melhorias para suportar comunicações bidirecionais (Zeb *et al.*, 2022), o que tende a favorecer a criação, por exemplo, de Gêmeos Digitais. Canuto, Salgado e Codinhoto (2022) mencionam a IoT como uma das tecnologias significativas que propiciaram a difusão de uso dos GDs; já Rafsanjani e Nabizade (2021) a compreendem como um componente principal para a produção de Gêmeos Digitais.

## 2.2 Gêmeos Digitais na Arquitetura

Uma infinidade de dados sendo transmitidos a uma réplica digital a ponto de torná-la capaz de imitar o mundo físico, essa é a descrição de um mundo espelhado apresentada por Gelernter (1992), no início do livro *Mirror Worlds*. Alguns anos mais tarde, na universidade de Michigan, Grieves e Vickers (2017) traziam em sua apresentação elementos importantes na visão de gerenciamento do ciclo de vida dos produtos que tomariam forma tempos depois no conceito de Gêmeos Digitais (GDs).

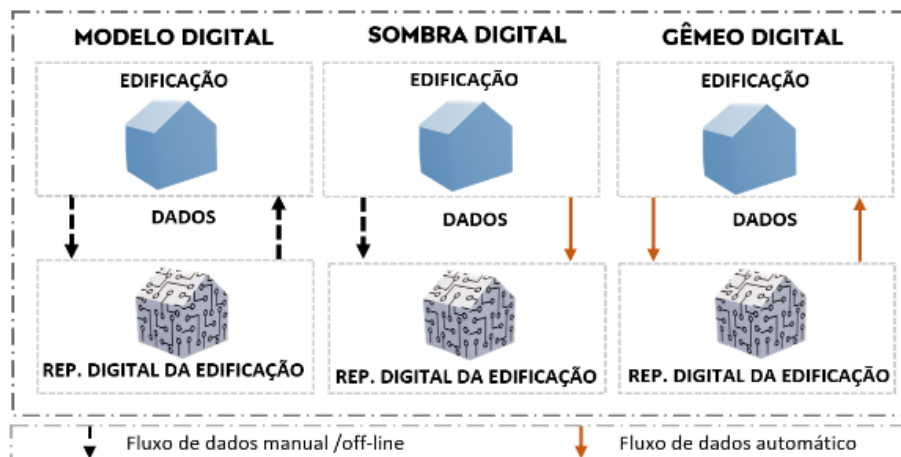
O conceito de Gêmeos Digitais se refere à representação digital que figura uma entidade física (Canuto; Salgado; Codinhoto, 2022; Garcia *et al.*, 2022), com capacidade de realizar uma transferência bidirecional de dados/informações (Grieves,

2014; Kritzinger *et al.*, 2018; Sepasgozar, 2021). Grieves (2014; 2022), ao falar sobre os componentes principais de um Gêmeo Digital, elenca três elementos: o físico, o digital, e os dados e/ou informações que exercem o papel chave entre o digital e o tangível.

No entendimento de Grieves (2022), esses três elementos não precisam estar presentes em conjunto para se obter um GD. Portanto, se o Modelo Digital (MD) proposto como GD não chegasse a existir como uma contrapartida física, ele não seria compreendido como um GD; já quando sua existência ocorresse após o MD ou depois de sua ausência no mundo físico, ele seria um GD (Grieves, 2022).

Dentro do contexto da manufatura, Kritzinger *et al.* (2018) direcionam o processo de integração de dados/informações ao GD em três subcategorias (Figura 1). De acordo com os autores, um Modelo Digital representa digitalmente um objeto físico, sem a influência da inclusão de dados de modo automático entre os dois espaços (físico/digital); na Sombra Digital, esses dados se dariam com a passagem automatizada apenas do ativo físico para o modelo digital, possibilitando, por intermédio do físico, que haja a capacidade de realizar alterações no digital; já na categoria Gêmeo Digital, o processo ocorreria de forma bidirecional, em que ambos os ativos (físico/digital) trocam dados/informações e, desta forma, dependendo da finalidade, esses ativos poderiam exercer alguma alteração ou controle entre si (Agouzoul *et al.*, 2021; Céspedes-Cubides; Jradi, 2024; Kritzinger *et al.*, 2018; Nativi; Mazzetti; Craglia, 2021; Sepasgozar, 2021).

Figura 1 – Exemplo do fluxo de dados do Modelo Digital, da Sombra Digital e do Gêmeo Digital.



Fonte: Adaptado de Marques, Gonçalves e Souza (2022).

Segundo Xie *et al.* (2022), houve um aumento significativo anual de publicações sobre GD, tendo uma virada fundamental em 2018. As investigações entre 2003 e 2010 guiaram os primeiros passos e constituíam-se da exposição de ideias conceituais (Piascik; Lowry, 2010 *apud* Xie *et al.*, 2022). A fase inicial foi entre os períodos de 2011 e 2018, com ênfase na ampliação conceitual e na demonstração de um número reduzido de usos práticos. A partir de 2019, despertou-se um interesse maior, e as publicações e registros de patentes se tornaram mais expressivos (Xie *et al.*, 2022).

Para Garcia *et al.* (2022, p. 522), na “[...] construção civil, o gêmeo digital tem o potencial de romper o modelo tradicional de gestão da informação baseado em silos para um modelo integrado centrado em dados”. Abrangendo os anos de 2016 a 2023, Céspedes-Cubides e Jradi (2024) realizaram uma revisão de estudos sobre GDs da construção com foco na fase de operação e manutenção. Os autores observam uma tendência de crescimento no volume de publicações anuais e indicaram que as pesquisas que mais se destacaram foram as de revisão que resumem e analisam uma série de pesquisas sobre GDs. Hosamo *et al.* (2022), em suas investigações, utilizando três bases de dados, identificaram um crescimento mais intenso de publicações na área de Arquitetura, Engenharia, Construção (AEC) e Gerenciamento de Instalações a partir do ano de 2021.

Na AEC, o Gêmeo Digital também vem sendo abordado com a associação a *Building Information Modeling* (BIM). De acordo com Nguyen e Adhikari (2023), o BIM é um processo que propicia a criação e a gestão de um modelo digital com informações detalhadas, permitindo a realização de um trabalho colaborativo que minimiza possíveis discordâncias entre os envolvidos nos projetos. Para Garcia *et al.* (2022, p. 525, tradução nossa), “[...] Ainda há uma 'zona cinzenta' sobre a definição do conceito, com alguns autores referindo-se ao termo Gêmeo Digital como sendo BIM ou *Cyber-Physical System* - CPS”. Isso pode ser identificado em diversas publicações, por exemplo, em Tita *et al.* (2023), em que o BIM é entendido como um tipo de GD. Já Bojea *et al.* (2020) e Andrade e Guimarães (2023) o entendem como elemento constituinte dos GDs. Por outro lado, Pregolato *et al.* (2022) compreendem a sincronização físico/digital como as características que diferem um GD de outras formas de representação digital, como o BIM.

Douglas, Kelly e Kassem (2021) têm como foco investigar essas disparidades entre BIM e CPS em GD. Em relação ao BIM, segundo os autores, existem três interpretações distintas: a primeira é que o GD dá sequência ao BIM de forma a crescer outras tecnologias; na segunda, eles são entendidos como distintos, pois apresentam diferenças em suas características e capacidades; a terceira é que ambos os conceitos se complementam sendo possível utilizá-los em variados estágios do ciclo de vida de um ativo. Nguyen e Adhikari (2023) realizam uma revisão da literatura sobre BIM e GD e as principais diferenças identificadas entre os conceitos estão resumidas no Quadro 1.

Quadro 1 - Disparidades entre GD e BIM.

	<b>GD</b>	<b>BIM</b>
Uso principal	Operação e manutenção.	Fases de projeto e construção.
Tecnologias de suporte	Redes de sensores sem fio, análise de dados e Aprendizado de Máquina - AM (do inglês <i>Machine Learning</i> ).	Modelos 3D, ambientes de dados comuns e classes básicas da indústria.
Interoperabilidade	Através de formatos abertos de troca de dados e APIs, em tempo real e integrados com dispositivos IoT.	Por meio de formatos abertos de troca de dados e APIs.

Fonte: Elaborado a partir de Nguyen e Adhikari (2023, p. 17, tradução nossa).

De acordo com Rafsanjani e Nabizadeh (2021), o ciclo de vida das estruturas físicas na AEC está dividido em duas fases principais: Projeto e Construção, seguidas de Operação e Manutenção (O&M). Sobre a abordagem de Grieves (2022), se fosse observado no contexto de um GD de produto associando as quatro etapas do ciclo de vida (criar, construir, operar/sustentar e descartar), o modelo BIM poderia ser enquadrado como um GD Protótipo já na primeira etapa (criar), contanto que tivesse as informações necessárias (matérias, simulação...) para sua materialização. O setor da construção aparenta ter adotado predominantemente o GD mais focado na terceira fase do ciclo de vida, a de operar/sustentar, o que pode ser observado em Nguyen e Adhikari (2023), em que o BIM tem seu uso principal nas fases de projeto e construção, e GD na operação e manutenção. Rafsanjani e Nabizadeh (2021) também expõem uso do BIM mais integrado à primeira fase e à Internet das coisas na segunda.

Essa conformação de escolha do método e ferramentas de modelagem digital variam de acordo com a intenção (Nhamage, 2023). Por exemplo, seu uso pode estar atrelado ao desempenho dos ativos físico ou ao comportamento dos usuários (Bolpagni *et al.*, 2023; Jiao *et al.*, 2024), sendo que para o segundo caso, nem sempre

a modelagem BIM será a mais adequada, como na visualização em tempo real de componentes que representam seres humanos (Deng; Menassa; Kamat, 2023).

Em suma, este tópico proporcionou uma visão sobre os Gêmeos Digitais e sua relação com a arquitetura. A intenção é que a modelagem digital não seja um arquivo de revisitação do projeto após sua execução (Bojea *et al.*, 2020), mas que faça parte do acompanhamento de alterações ao longo do ciclo de vida. Existe uma tendência de uso dos GD neste campo nas fases de operação e manutenção, e estudos discutem sobre sua relação com o BIM (Douglas; Kelly; Kassem, 2021, Garcia *et al.*, 2022).

### 2.2.1 Gêmeos Digitais e a sinergia entre as tecnologias

É compreensível que desde o início dos anos 2000, outras tecnologias que obtiveram avanço significativo como a Internet das Coisas, Inteligência Artificial, Blockchain, dentre outros, despertem interesse incorporadas aos GDs. De acordo com Rafsanjani e Nabizadeh (2021), a IoT faz uso da infraestrutura de Internet para interligar objetos dentro de um edifício, viabilizando comunicações e interações em tempo real, a fim de aprimorar a eficiência dos ambientes. Para Ploennigs; Ba e Barry (2018), a análise de dados IoT resultam em um novo valor econômico, promovem melhorias nas operações em edificações, desde o conforto dos usuários à manutenção por demanda.

A Internet das Coisas Cognitiva, aplicada a edifícios, é trazida em Ploennigs, Ba e Barry (2018). Segundo os autores, os sistemas IoT são capacitados com computação cognitiva, e com isso podem aprender, raciocinar e extrair *insights* de dados, que com o tempo serão aprimorados constantemente. Os três componentes que formam a base do sistema de computação cognitiva são: Componentes de Sensoriamento, Modelagem e Raciocínio Semântico, e o Aprendizado de Máquina (Ploennigs; Ba; Barry, 2018).

A ideia de cognição também é visada para os GDs do ambiente construído. O Gêmeo Digital Cognitivo é compreendido como um estágio avançado que agrega comunicação, análise e inteligência (Yitmen *et al.*, 2021; Yitmen, 2023). De acordo com Yitmen e Alizadehsalehi (2023), há ausência de concordância consistente sobre a definição de Gêmeos Digitais Cognitivos, mas, cinco elementos e características são

frequentemente identificadas, sendo: ter um GD como base; existir capacidade cognitiva; permitir o gerenciamento completo do ciclo de vida; dispor de alguma forma de capacidade autônoma; e ter evolução contínua (adaptação).

Sobre a perspectiva de conceder “inteligência” a um GD no mundo virtual, Grieves (2022) cita além da simulação o uso da Inteligência Artificial. “Desde os anos 1970, houve uma expansão do uso da Inteligência Artificial (IA) para a solução de problemas reais” (Faceli *et al.*, 2021, p. 1). Segundo Peng *et al.* (2020), a IA passou a ser incorporada de modo orgânico aos sistemas de GD com o intuito de produzir análises, reconhecer eventos, detectar falhas e auxiliar na tomada de decisão, sendo trabalhado com modelos de aprendizado de máquina e aprendizagem profunda. Bojea *et al.* (2020) propõem três níveis de evolução dos GDs na construção, em que, no último estágio, a presença da IA estaria ligada aos agentes inteligentes concedendo ao GD uma atuação sobre o ambiente de modo autônomo com supervisão humana (Bojea *et al.*, 2020). Contudo, esta multiplicidade de dados gerados pela IoT usados em modelos de IA, acabam ocasionando preocupações em relação a segurança.

A Blockchain<sup>3</sup> é uma tecnologia com características que auxiliam a ampliar a segurança durante a transferência e registro de dados, e, portanto, o seu potencial tem despertado olhares para ser agregada aos GDs (Lv; Cheng e Lv, 2023). Segundo Sadri *et al.* (2023), na literatura, a Internet das Coisas e a Inteligência Artificial demonstram ser benéficas para trazer melhorias aos GDs baseados em Blockchain, propiciando mais eficiência nos registros para o setor da construção (Xu *et al.*, 2018 *apud* Sadri *et al.*, 2023).

A união entre Gêmeos Digitais e a Realidade Aumentada (RA)<sup>4</sup>, para Dani *et al.* (2023), pode aumentar a consciência de contexto, pois o acesso aos dados é realizado em interface mais intuitiva, tendo em vista que esse tipo de interação envolve a representação digital, o ambiente tangível e os dados. Nos resultados de suas pesquisas, que envolve Realidade Virtual (RV)<sup>5</sup> e Realidade Aumentada, Mohammadi, Vimal e Taylor (2020) fazem colocações semelhantes:

---

<sup>3</sup> Blockchain: “Blockchain é um livro-razão compartilhado e imutável que facilita o processo de registro de transações e rastreamento de ativos em uma rede de negócios” (IBM, s.d. a).

<sup>4</sup> A Realidade Aumentada “[...] refere-se à integração em tempo real de informações digitais ao ambiente do usuário” (IBM, s.d. b).

<sup>5</sup> A Realidade Virtual “[...] substitui completamente o mundo físico, oferecendo aos usuários uma visão de 360 graus dos ambientes gerados por computador” (IBM, s.d. b).

Com uma coleção de dados estruturados e não estruturados ao alcance do usuário, enquanto imerso em um ambiente virtual simulado, o gêmeo digital proporciona ao usuário uma experiência sensorial ampliada, incorporando a percepção humana, o raciocínio e a expertise do domínio ao processo de descoberta do conhecimento (Mohammadi; Vimal; Taylor, 2020, p. 1662, tradução nossa).

Em conclusão, agregar essas tecnologias aos GDs pode moldar uma outra relação com os espaços, pois, com a IoT + IA o GD pode se tornar parte ativa na manipulação dos ambientes (Agostinelli *et al.*, 2021; Bojea *et al.*, 2020), por isso é de extrema importância pensar estratégias para garantir a segurança como a tecnologia de Blockchain (Lv; Cheng e Lv, 2023).

### 2.2.2 Explorando as aplicações de Gêmeos Digitais no ambiente construído: Visão global e perspectivas brasileiras.

Esta subseção apresenta exemplos de aplicações práticas e experimentais em torno do uso de GD. O primeiro momento foca em pesquisas fora do âmbito nacional, já no segundo são explorados estudos de caso desenvolvidos no Brasil.

Martins *et al.* (2022) realizam um estudo de caso para produção do GD de um escritório localizado em Portugal, sendo trabalhados três componentes, que incluem um modelo BIM, sensores IoT e um visualizador. Os autores consideram o resultado satisfatório, permitindo a visualização e a análise de dados de forma interativa e dinâmica. A pesquisa não faz menção de interações encaminhadas do modelo digital para físico, porém, descreve que há pretensão em trabalhos futuros de se utilizar sistemas para controle de equipamentos (Martins *et al.*, 2022).

No contexto do patrimônio cultural, diversas tecnologias são adotadas para diferentes finalidades como a documentação, monitoramento, produção de materiais educacionais, entre muitos outros. Segundo Canuto, Salgado e Codinhoto (2022), o GD em conjunto com *Heritage Building Information Modeling*<sup>6</sup> (HBIM) traz oportunidades de facilitar o processo de gestão patrimonial. A solução proposta em Ni *et al.* (2022) integra IoT e ontologia para criar um GD de um edifício histórico. O estudo de caso ocorreu em um Teatro na Suécia, utilizando sensores na coleta de dados entre os anos de 2021 e 2022. O propósito foi compreender o impacto da

---

<sup>6</sup> A *Heritage Building Information Modeling* (HBIM), é uma variação do BIM focada no patrimônio histórico englobando dados adquiridos de levantamentos indiretos (Murphy; McGovern; Pavia, 2013).

ocupação e identificar alterações na umidade relativa do ar, a fim de avaliar possíveis riscos na conservação do edifício. Segundo os autores, o GD proporcionou dados atualizados para análises que favorecem a tomada de decisão da conservação e do conforto ambiental da edificação.

Na perspectiva de informações centradas no ser humano, Deng, Menassa e Kamat (2023) expõem o conceito de Identidade Digital Humana. Apesar de não haver menção direta ao termo Gêmeos Digitais, a estrutura proposta visa, por meio da coleta de dados dinâmicos e estáticos processados com algoritmos de Aprendizado de Máquina, aprimorar as condições de conforto térmico e iluminação (reduzir o consumo de energia) em ambientes internos. Com isso, um estudo de caso é apresentado, em que são usados dados fisiológicos, modelagem BIM, e um motor de jogos<sup>7</sup> com finalidade de visualizar informações em “tempo real”. De acordo com os autores, o uso desse conceito possibilita o gerenciamento dos ambientes internos com foco nas pessoas.

Um estudo de caso de um GD para um conjunto habitacional foi trazido por Evangelou, Gkeli e Potsiou (2022). Os autores conseguem centralizar as informações por meio de um modelo BIM e um motor de jogos que recebe variados dados de sensores (consumo de energia, temperatura, umidade). O projeto também é capaz de visualizar as câmeras da edificação dentro do modelo digital. Entre os benefícios apontados nesta implementação, está o monitoramento do consumo de energia.

Peng *et al.* (2020) trazem um estudo de caso de um hospital em Xangai, China. Os hospitais possuem sistemas específicos, e nesse caso, o objeto do estudo funciona 24 horas, o que pode dificultar para o setor de operação e manutenção que recebe diversos dados de múltiplas fontes. O método utilizado foi a integração contínua do ciclo de vida, trabalhando desde o projeto até a O&M, com isso, para o desenvolvimento, dados de três anos foram incorporados, além de recursos de Realidade Mista no auxílio de criação do modelo, e a Inteligência Artificial na conjugação dos dados e diagnóstico (Peng *et al.*, 2020). O artigo relata que o sistema está em uso há mais de um ano.

---

<sup>7</sup> Um motor de jogos é um *software*, que fornece uma gama de recursos para facilitar o desenvolvimento de jogos 2D e 3D (Valeri, 2023).

Kalantari *et al.* (2022) utilizam um protótipo denominado de Ph2D, capaz de atualizar as alterações físicas em “tempo real” na interface do *Grasshoper/Rhinoceros*. Uma série de placas com microcontroladores (peças) são conectadas e transferem o arranjo do *layout* arquitetônico para o digital, onde o modelo também é capaz de sugerir alterações.

Jiao *et al.* (2024) trazem um olhar do GD na segurança do canteiro de obras, realizando simulações capazes de prever as movimentações dos trabalhadores. Os autores utilizam Aprendizado profundo (subárea da IA), com uma abordagem que não é apenas uma representação digital, eles consideram os resultados obtidos capazes de trazer previsões precisas a fim de evitar risco para os colaboradores (Jiao *et al.*, 2024).

Khajavi *et al.* (2023), apresentam dois estudos de casos direcionados a incêndios e detecção de anomalias em edificações. O primeiro, é para um escritório onde um sensor detecta o foco de incêndio, realiza um alerta e exibe no modelo digital (uma vela foi usada para validar o sistema) (Figura 2); o segundo, foi implantado em uma fazenda no prédio de secagem de grãos para realizar o monitoramento de possíveis anomalias nas variações de temperatura em motores e rolamentos. O sistema atingiu precisão na detecção de pequenas chamas e anomalias (Khajavi *et al.*, 2023).

Figura 2 – “O fogo do tamanho de uma vela é detectado e instantaneamente exibido no modelo de visualização 3D do gêmeo digital” (Khajavi *et al.*, 2023, p. 52347, tradução nossa).



Fonte: Khajavi *et al.* (2023), licença: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>, via IEEE.

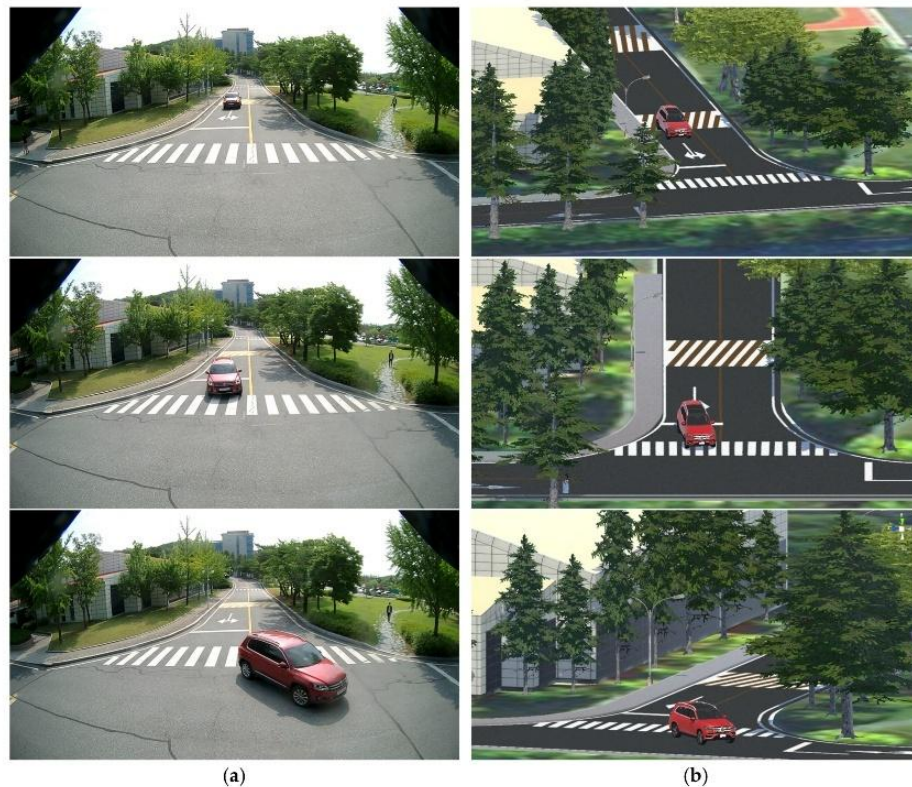
Pesquisas também abordam a adoção de GDs em construções de estruturas presentes na infraestrutura urbana. Pregnoloato *et al.* (2022) trazem um estudo de caso de uma ponte suspensa em Clifton, Reino Unido. O método aplicado para a criação do GD é dividido em cinco etapas: aquisição de dados e necessidades, modelagem digital, transmissão dinâmica de dados, integração de dados/modelos e operação. Na representação digital, o *software* Midas GEN foi empregado na modelagem de elementos finitos. Os dados usados na transferência são advindos de uma série de sensores instalados na ponte. O produto alcançado é um modelo digital da ponte em processo de validação (Pregnoloato *et al.*, 2022).

Outro exemplo aplicado a uma ponte é exposto por Nhamage (2023), em que o assunto central foi a análise de fadiga em uma ponte ferroviária metálica. O autor expõe uma metodologia dividida em três fases: definição dos requisitos de informação, *design* do *framework* e a criação do modelo. A visualização da evolução das fadigas com base nas simulações é exposta em cores no modelo digital. Foram realizados testes iniciais com dois cenários, e os resultados se mostraram promissores, mas relata que seria necessário testar outros cenários para o fechamento do modelo (Nhamage, 2023).

Mohammadi, Vimal e Taylor (2020) abordam cidades inteligentes com GD em um projeto prático para um campus universitário na Geórgia, desenvolvendo uma plataforma de Realidade Virtual (RV) que permite visualizar um conjunto de dados coletados. Um aspecto interessante é que além de dados de sensores, dados de redes sociais e de interação dos usuários no aplicativo de Realidade Aumentada também se comunicam com a plataforma RV, sendo possível filtrar os dados por período. O usuário estando no local consegue disponibilizar dados georreferenciados como fotos e comentários.

No contexto do estudo sobre GDs urbanos, Lee *et al.* (2022) trazem uma plataforma para gerenciar e visualizar informações sobre mobilidade urbana de pessoas e veículos, desenvolvendo a proposta com dados georreferenciados de câmeras *Closed-Circuit Television* (CCTV) e trazendo um sistema que permite anonimizar dados como a placa de veículos. Vale ressaltar que o rosto das pessoas não é detectado neste estudo. A Figura 3 expõe o modelo teste produzido pelos autores.

Figura 3 – Exemplo trazido por Lee *et al.* (2022), um modelo 3D de um veículo no ambiente digital, capaz de reproduzir os movimentos de sua contraparte no mundo físico.



Fonte: Lee *et al.* (2022), licença: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>. via MDPI.

No contexto nacional, em Lyra, Katakura e Martins (2022), um GD para um Campus Universitário situado em São Paulo é exposto. Nessa pesquisa, a modelagem digital das edificações foi feita em um *software* BIM, e os dados produzidos por um projeto intitulado: *Smart Campus Mauá* passaram a ser agregados ao modelo digital por intermédio de uma plataforma *Cloud Based*. O resultado, de acordo com os autores, traz auxílio na gestão mais eficaz dos recursos e manutenção dos espaços.

Em outro estudo, Martins e Lyra [2022?] trazem um GD de uma Biblioteca lotada no campus do Instituto Mauá de Tecnologia em São Paulo. Sensores dispostos em três ambientes da edificação direcionam os dados para a plataforma *Smart Campus Mauá*, e esses dados são encaminhados para um modelo BIM. Algumas etapas contaram com a participação colaborativa de alunos e profissionais. Os autores mantiveram o modelo sob observação durante uma semana e constataram o potencial para melhoria na eficiência energética, econômica e gestão eficiente do ciclo de vida (Martins; Lyra [2022?]).

Araújo *et al.* (2019) demonstram um GD com transferência bidirecional de informações. Nesse trabalho foi elaborada uma maquete física integrada a sensores e atuadores, e um modelo digital BIM. Os dados coletados pelos sensores são recepcionados por um banco de dados, e a comunicação físico/digital ocorre a partir de uma plataforma *Cloud Based*. As ações de acender e desligar o *Light-Emitting Diodes* (LED) foram possíveis a partir do modelo digital, um sensor de presença no modelo físico confirmou a passagem de informações para o meio digital (Araújo *et al.*, 2019).

No estudo de caso de Passos *et al.* (2022), um sistema é implementado no ponto de água de um banheiro residencial. O GD trazido pelos autores utiliza uma placa micro controladora e sensores para coleta de dados. Esses dados passaram a ser transferidos para uma plataforma em nuvem, e um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE). A modelagem digital tridimensional do local e a visualização dos dados de consumo foi realizada em dois *softwares*: *Revit* e o *Rhinoceros/Grasshopper* com alguns *plugins*.

Com o foco no monitoramento remoto de encostas e áreas de risco, Mariano *et al.* (2023), realiza um estudo de caso nas Dunas da Joaquina em Florianópolis - SC, desenvolvendo um dispositivo equipado com sensores para coleta de dados. Os dados gerados foram transferidos via antena de rádio, sendo tratados e encaminhados à réplica digital tridimensional do local (GD) expondo as alterações no modelo em “tempo real”. Os autores consideram os resultados promissores apontando benefícios na adoção do monitoramento como ação preventiva para a tomada de decisões em áreas de risco.

### **3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS**

Neste capítulo são apresentados os métodos de pesquisa e a abordagem estabelecida por meio do uso do *Design Thinking* (DT) para o desenvolvimento do experimento proposto. A seguir, as fases do experimento são apresentadas.

### 3.1 Classificação e Método da Pesquisa

Esta pesquisa é classificada como experimental, que combina a revisão de literatura a fim de designar uma base sólida de conhecimento prévio, com o desenvolvimento de um protótipo experimental. A abordagem do estudo possui natureza qualitativa. O *Design Thinking* - DT foi utilizado como base para a definição das etapas do experimento que, de acordo com Brown (2020), é uma abordagem centrada na resolução de problemas que pode conduzir a soluções inovadoras e eficazes. O DT é adotado em diferentes campos e não segue uma progressão linear.

### 3.2 Revisão da Literatura

A primeira fase da pesquisa foi direcionada à revisão da literatura de artigos científicos nacionais e internacionais presentes em bases de dados como o Periódicos Capes, *Web of Science*, *Scopus* e Google Acadêmico, entre outras publicações identificadas na *web*. O foco foi identificar estudos relacionados ao conceito de Gêmeos Digitais alinhados à Internet das Coisas no ambiente construído, com a vertente de compreender sua aplicação na gestão, e quais ferramentas haviam sido utilizadas nos estudos de caso práticos ou tivessem sido mencionadas em artigos de revisão. Os resultados desta etapa são apresentados no item 4.1 Revisão da Literatura.

### 3.3 Estruturação da Pesquisa com o *Design Thinking*

A estrutura proposta nesta pesquisa perpassa as quatro etapas integrantes do processo de *Design Thinking*: empatia/entender, definição, ideação, prototipagem e testes (Hasso-Plattner Institute of Design, 2010). Na sequência, essas etapas são apresentadas no contexto do experimento.

#### a) Empatia/Entender

A maioria das construções são estruturas estáticas que permanecem fixas ao longo do tempo, mas as condições climáticas variam periodicamente. A luz natural é importante para o bem-estar das pessoas, porém em excesso pode gerar desconforto na execução de tarefas específicas e cotidianas.

b) Definir

Uma das soluções desenvolvidas para o controle de incidência solar sobre as aberturas das edificações foi o brise ou brise-soleil. Ao longo dos anos, diversas variações desse elemento foram criadas com versões fixas, retráteis e dinâmicas. Tendo em vista que com o posicionamento adequado, o brise-soleil pode ser uma opção eficiente no sombreamento, optou-se por sua escolha.

c) Ideação

A ideia é construir um sistema de sombreamento da abertura que se adapte de forma automática, realizando o monitoramento em tempo real por meio de sua réplica digital.

d) Protótipo

A prototipagem formaliza ideias possibilitando observar os pontos fortes e fracos, permitindo compreender quais aspectos são relevantes para serem implementados nos próximos protótipos (Brown, 2020). Portanto, tendo a ideia definida, procedeu-se à elaboração dos protótipos físico e digital.

e) Testar

Com os protótipos produzidos, inicia-se a fase de testes que foram realizados a fim de avaliar o funcionamento adequado dos protótipos.

f) Avaliação da implementação

Nessa etapa ocorreu a avaliação dos protótipos, sendo designados três cenários para a análise: o ambiente de estudo do caso sem o brise, com o brise em modo estático e com ele em modo dinâmico.

### 3.4 Ambientes dos estudos de caso

Quatro ambientes de estudo de caso foram fabricados com ferramentas manuais utilizando placas de gesso acartonado (12,5mm), medindo 0,80m x 0,60m x 0,60m (sem considerar a cobertura) e correspondendo a 12 metros quadrados na escala 1:5 (4m x 3m x 3m). Cada ambiente possui uma abertura em vidro de tamanho 0,30m x 0,20m (Figura 4). Foram utilizados no estudo três deles para instalação dos protótipos do brise (com as aletas em modo estático e dinâmico correspondente ao GD). Um desses ambientes de estudo de caso foi usado exclusivamente no laboratório durante

o processo de verificação do funcionamento do brise físico (conexões e movimento), sendo desativado logo em seguida<sup>8</sup>.

Figura 4 – Ambiente de estudo do caso 1 - sem o Brise.



Fonte: Autora (2025).

### 3.5 Percepção: Sensores e Atuadores

A fim de coletar dados internos dos três ambientes de estudo de caso, três dispositivos de monitoramento foram desenvolvidos. Foi priorizada a utilização de componentes de baixo custo, mas que apresentassem boa precisão, buscando conciliar acessibilidade e desempenho. A Indicação dos dados coletados em cada dispositivo de monitoramento e os componentes de *hardware* utilizados nos dispositivos e no protótipo físico do brise são apresentados abaixo e na Figura 5:

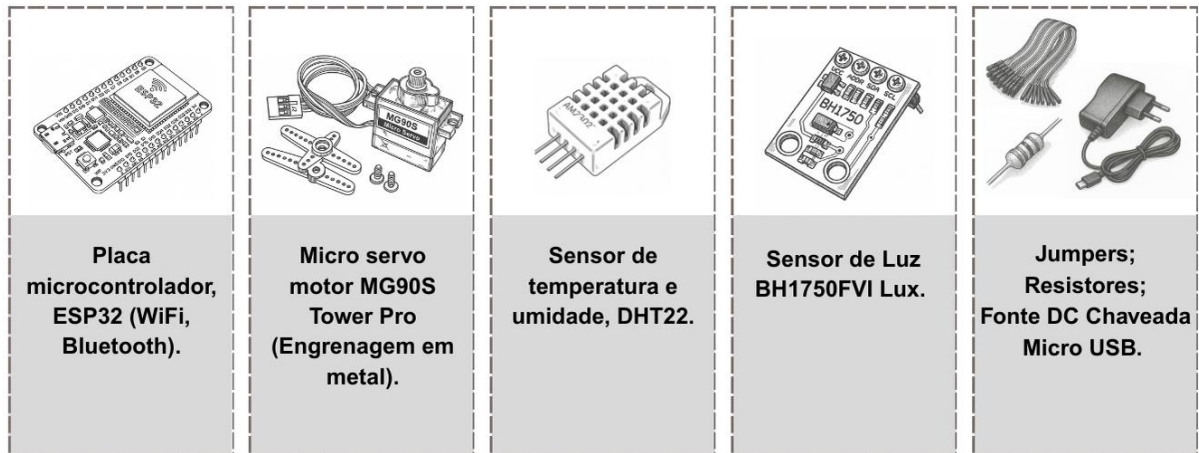
- a) Dispositivo 1 (Ambiente de estudo do caso 1 – sem o Brise): Temperatura, umidade e iluminação.
- b) Dispositivo 2 (Ambiente de estudo do caso 2 – com o Brise em posição fixa): Temperatura, umidade e iluminação.
- c) Dispositivo 3 (Ambiente de estudo do caso 3 – com o Brise dinâmico): Temperatura, umidade, iluminação e ângulo do micro servo.<sup>9</sup>

---

<sup>8</sup> Este ambiente de estudo do caso foi usado nos testes iniciais expostos na seção 4.2.1 Produção dos Brises.

<sup>9</sup> Micro servos são dispositivos pequenos e eletromecânicos capazes de realizar movimentos precisos e controlados (Guse, 2024).

Figura 5 – Componentes de hardware.



Fonte: Autora (2025).

Foram desenvolvidos três cases com o material *Medium Density Fiberboard* (MDF) cortados a laser para adicionar os componentes eletrônicos. Após a montagem dos componentes (Figura 6), os microcontroladores receberam as instruções via ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) por meio do *software* Arduino IDE.

Figura 6 – Um dos dispositivos de monitoramento.



Fonte: Autora (2025).

O parâmetro definido para conduzir o posicionamento do brise é a iluminação. Propôs-se o ajuste do mesmo a partir da identificação dos dados correspondentes ao nível de intensidade lumínica coletado pelo sensor do dispositivo de monitoramento 3 instalado no ambiente de estudo do caso 3 (brise dinâmico), sendo delimitado os valores de 300 a 700 lux. Dados de temperatura e umidade internas também foram

obtidos com intuito de avaliar se há interferência na temperatura em decorrência do uso do sistema de sombreamento.

### 3.5.1 Monitoramento

Os dispositivos fabricados (Figura 6) foram instalados em cada ambiente de estudo de caso, colocando-os a uma altura equivalente a um plano de trabalho (0,75m), correspondendo a 0,15m na escala de 1:5. Isso foi realizado pois a NBR ISO/CIE 8995 -1: 2013 sugere que a coleta de dados de iluminação interna seja na altura do plano de trabalho.

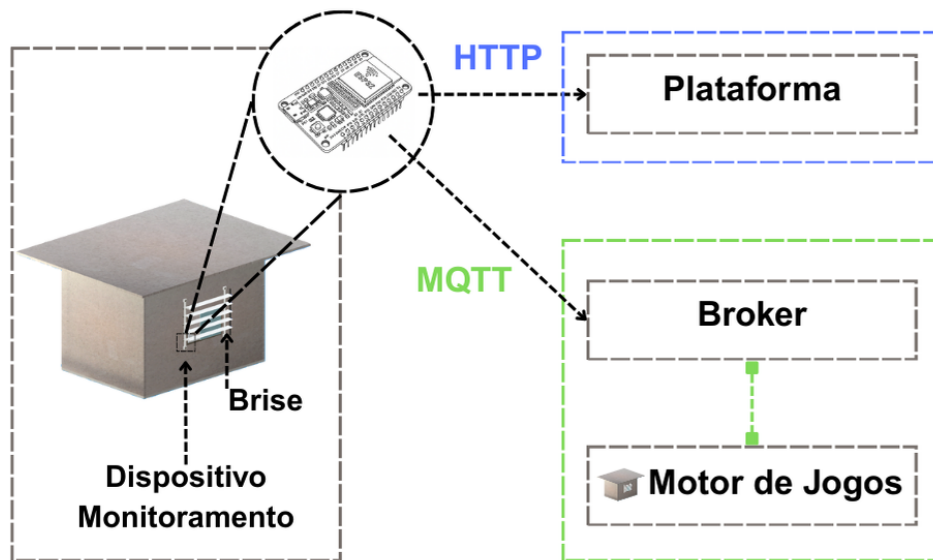
Os dados coletados de todos os dispositivos (iluminação, temperatura, umidade e ângulo do servo) foram enviados para uma plataforma *web*. “O *ThingSpeak* é um serviço de plataforma de análise de IoT que permite agregar, visualizar e analisar fluxos de dados ao vivo na nuvem” (Mathworks, s.d.). Ele possui opções de licenças pagas e gratuitas. E, neste trabalho, foi utilizada a versão gratuita com a criação de 3 canais, um para cada dispositivo. O limite diário de registro de dados na plataforma é de aproximadamente 8219 mensagens (Mathworks, s.d.).

### 3.5.2 Rede

Na concepção de projetos IoT, uma diversidade de protocolos de comunicação pode ser utilizada de acordo com as necessidades de cada projeto (Mishra; Kertesz, 2020). Nesse estudo, dois protocolos de comunicação foram usados. O primeiro é o *Hypertext Transfer Protocol* (HTTP), seu processo de transferência de dados no experimento está atrelado à comunicação com a plataforma *ThingSpeak* que recebe os dados transferidos do microcontrolador para um dos canais da plataforma. O segundo é o protocolo *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT). Ele é atrativo na elaboração de projetos IoT e foi adotado para o envio de dados (via Wi-Fi) do dispositivo de monitoramento instalado no ambiente de estudo do caso 3 (vinculado ao mini servo motor) do brise físico para o brise digital (Figura 7). Essa decisão foi fundamentada no potencial de comunicação bidirecional (Mishra; Kertesz, 2020), que funciona por meio do modelo publicação/assinatura, com três elementos base, que neste estudo correspondem a:

- a) MQTT *Client/Assinate* – O receptor como réplica digital do Brise e o microcontrolador.
- b) MQTT *Server/broker* - Um Computador de borda Única Raspberry Pi 3, modelo B, que recebe as mensagens publicadas realizando o encaminhamento ao MQTT *Client/Assinate*.
- c) MQTT *Client/Publicador* – Microcontrolador do dispositivo de monitoramento.

Figura 7 – Protocolos do experimento no ambiente de estudo do caso 3.



Fonte: Autora (2025).

### 3.6 Os Protótipos do Brise

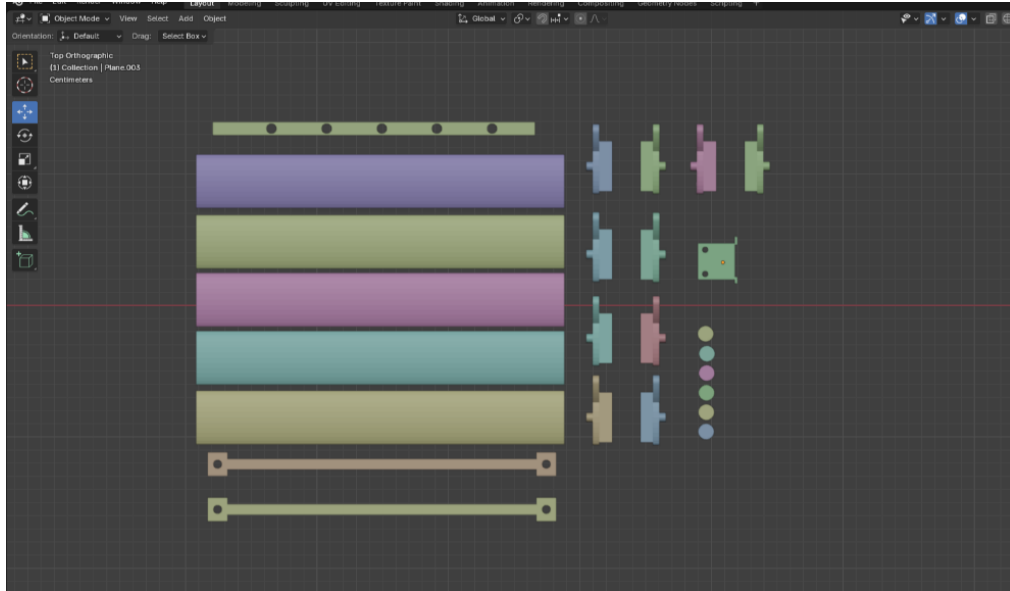
A fim de validar o método, dois protótipos físicos do brise na escala de 1:5 foram desenvolvidos, buscando apresentar a maior semelhança viável com sua versão digital.

#### 3.6.1 Modelo Digital

Os mais variados *softwares* são usados para desenvolver modelos digitais e, neste estudo, a representação digital foi feita no *software Blender*. Sua primeira versão, criada em 1994 por *Ton Roosendaal* e usada em seu estúdio *NeoGeo*, anos mais tarde, em 2002, passou a ser distribuída sob licença GNU - *General Public Licence* (Blender, s.d. a). A determinação de sua escolha para o projeto do brise, parte de seu potencial como ferramenta versátil que possui diversos recursos avançados,

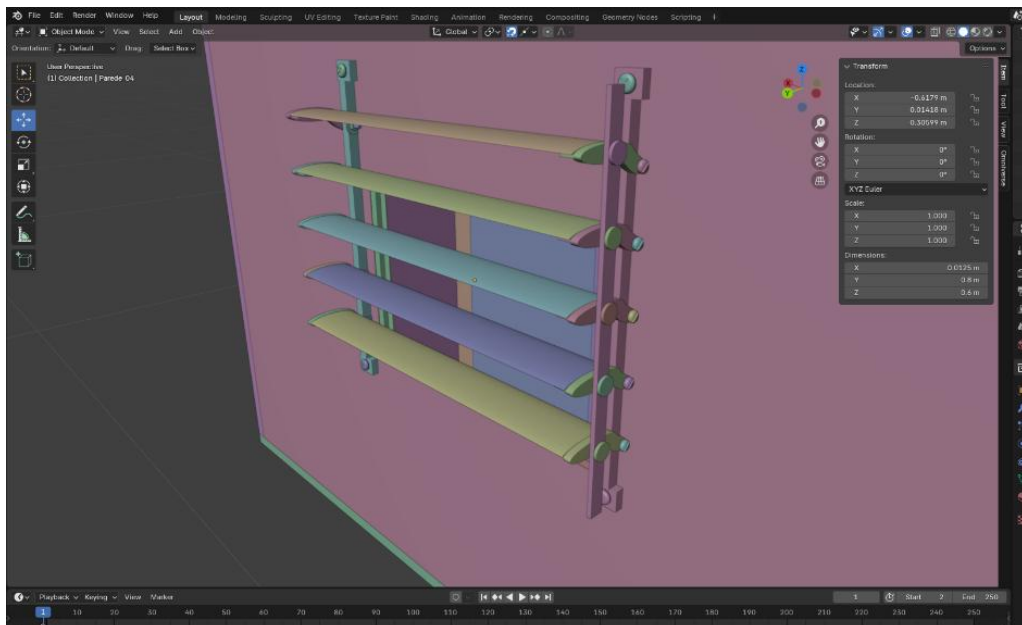
que permitem o desenvolvimento de projetos que envolvem modelagem, renderização e animação de forma gratuita (Blender, s.d. b). As peças foram modeladas separadamente e o modelo definido do Brise foi o Asa de avião (Figura 8 e 9).

Figura 8 – Partes do Brise e suporte do micro servo, modelados digitalmente no *software Blender*.



Fonte: Autora (2025).

Figura 9 – Modelo digital versão final do Brise, desenvolvido no *software Blender*.



Fonte: Autora (2025).

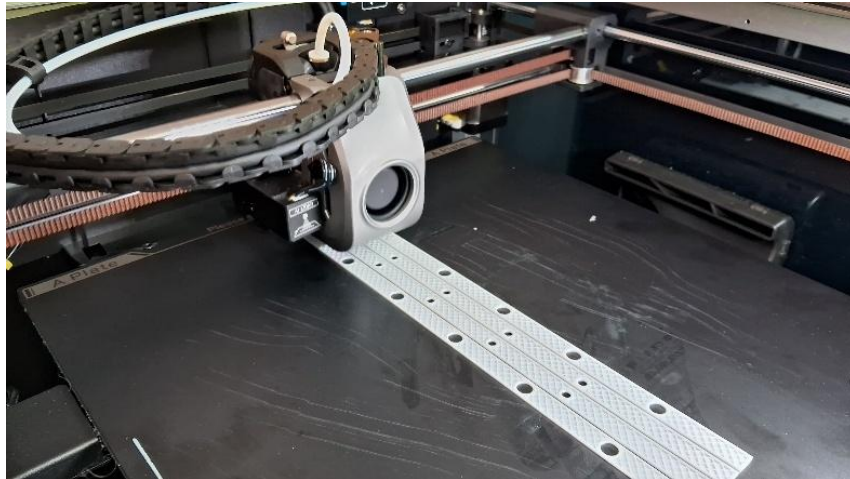
### 3.6.2 Projeto e Materiais

O projeto digital do Brise tornou-se um guia para a produção física. Neste estudo, a combinação de técnicas de fabricação digital e manuais foi adotada na

criação do Brise. A tecnologia de Manufatura Aditiva (MA) foi definida por permitir que o modelo digital seja materializado conforme as especificações de sua versão digital.

O processo da MA envolve a sobreposição de camada de material (Figura 10), neste caso, de termoplásticos (pelo método de extrusão *Fused Deposition Modeling*), cujo posicionamento dessas camadas é guiado a partir de predefinições computadorizadas (Paiva; Nogueira, 2021; Pereira; Gasi; Lourenço, 2019). As etapas para a fabricação constituíram-se da modelagem digital, seguida por sua exportação em formato *.stl* e importação no *software* de fatiamento (definição dos parâmetros). Após esse processo, o modelo é exportado novamente em *.gcode*, e é realizada a impressão física por meio do equipamento (Lefteri, 2013) (Figura 11).

Figura 10 – Impressão de peças do Brise com a tecnologia de Manufatura Aditiva.



Fonte: Autora (2025).

Figura 11 – Etapas realizadas até a impressão.



Fonte: Autora (2025).

Uma vez que as peças estavam prontas, foi feito o processo de montagem via colagem das aletas nas peças pivô e inserção dos parafusos para fixação das peças, o que garante a movimentação para o Brise do ambiente de estudo do caso 3. Os protótipos impressos foram acoplados aos ambientes de estudo do caso 2 (fixo) e 3 (dinâmico).

### 3.7 O Protótipo Digital

A revisão da literatura proporcionou o entendimento do cenário de ferramentas usadas na produção de GDs e contribuiu para a definição da ferramenta utilizada nesta pesquisa.

Ao observar a combinação entre a modelagem BIM e a IoT em seu artigo sobre GDs, Martins *et al.* (2022) citam três métodos de integração de dados: de modo direto na ferramenta de modelagem; por meio de motores de jogos e via *cloud-base*. De acordo com os autores, a metodologia que utiliza *cloud-base* oferece mais benefícios para a criação de GDs com soluções otimizadas, já que nas alternativas com motores de jogos, há a ausência de soluções prontas, demandando maior investimento em programação e configuração.

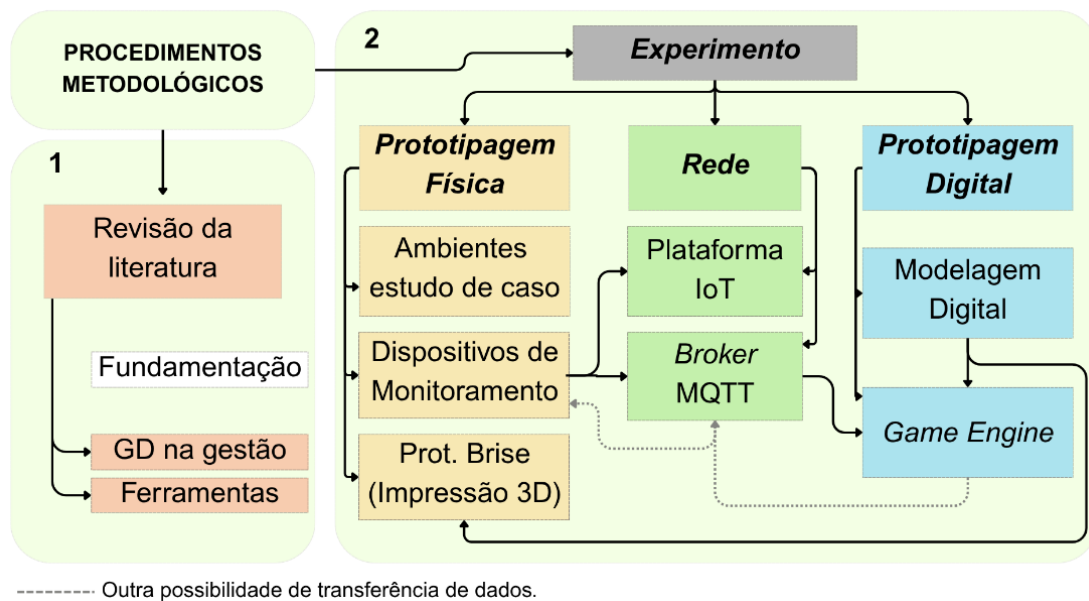
Deng, Menassa e Kamat (2023) fazem menção à adoção dos motores de jogos, a exemplo do *Unity*. Segundo os autores, ao comparar com as plataformas BIM, como o *Revit*, a visualização em tempo real dos componentes dinâmicos possui limitações derivadas dos mecanismos de atualização do modelo, as quais poderiam ser supridas nos motores de jogos pois, além da adoção de modelos BIM, as funcionalidades conduzem a uma resposta mais eficiente nesse contexto.

Tendo em vista o uso de ferramentas de acesso gratuito e o potencial das ferramentas de jogos nas visualizações em tempo real, nesta pesquisa, o *software Unity* foi escolhido como ferramenta visual para a integração dos dados no modelo digital. A *Unity* é uma das plataformas de destaque para a produção de jogos e suas versões de licenciamento incluem uma licença gratuita à *Unity Personal*. Após a produção do modelo digital do brise dinâmico no *software Blender*, o arquivo foi exportado em *.fbx* e importado para a *Unity*.

### 3.8 Avaliação

Nessa etapa, os ambientes de estudo de caso são mantidos em local externo, com sua abertura direcionada à fachada norte, sendo coletados dados de temperatura, umidade e luminosidade internos. Esse processo foi realizado a fim de analisar a interferência do protótipo físico do brise no ambiente de estudo do caso 3 ao longo do dia. A figura 12, apresenta um resumo da metodologia:

Figura 12 – Procedimentos metodológicos.



Fonte: Autora (2025)

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo visa expor os resultados obtidos a partir da execução da proposta apresentada. A revisão da literatura compõe a metodologia desta pesquisa, e busca compreender com enfoques mais específicos, consultando os estudos prévios, à influência dos Gêmeos Digitais nos processos de gestão no ambiente construído, além das ferramentas utilizadas ou mencionadas nos estudos de caso. Na sequência, é exposto os resultados da segunda etapa referente ao experimento proposto.

### 4.1 Revisão da Literatura

A seguir são trazidos os resultados da primeira etapa do capítulo de procedimentos metodológicos a de revisão da literatura. O primeiro momento é

direcionado aos GDs na gestão do ambiente construído; na sequência são apresentados um conjunto de ferramentas de estudos de caso.

#### 4.1.1 Influência dos Gêmeos Digitais nos processos de Gestão no ambiente construído

A adoção de GDs concede ao processo de gestão melhores estratégias para o planejamento e tomada de decisões em todas as fases de elaboração dos ambientes construídos, que envolvem o projeto, a execução e a pós-ocupação (Yitmen *et al.*, 2021). Como a ideia do GD é atrelada desde sua concepção enquanto projeto ou “GD protótipo” (Grieves, 2022), o cenário de experimentação (ex. simulação) vai possibilitar adotar soluções relevantes ainda na fase de projeto que possam reduzir custos futuros.

Schrotter e Hürzeler (2020) observaram estudos sobre o impacto das novas construções em vista da previsão de aumento populacional na cidade de Zurique (Suíça). Eles relatam que pelo GD é possível identificar características das novas construções que podem influenciar fatores climáticos e que essas informações servem como referência para guiar as decisões sobre projetos de construções públicas.

Na fase de execução em grandes canteiros de obras, como trazido por Jiao *et al.* (2024), visando aumentar a segurança, o GD concede ao gestor dados para prever e compreender o fluxo dos trabalhadores, além de traçar estratégias para reorganizar locais de manuseio de materiais, de carga e descarga, para garantir e orientar sobre a segurança no local. Essas informações serão relevantes para a aplicação nas próximas obras. Para Evangelou, Gkeli e Potsiou (2022), o monitoramento em tempo real ainda na fase de construção possibilita ao responsável pela obra um entendimento controlado do andamento, para avaliar se o planejamento inicial está sendo trabalhado adequadamente ou é necessário alterar alguma dinâmica em relação aos insumos.

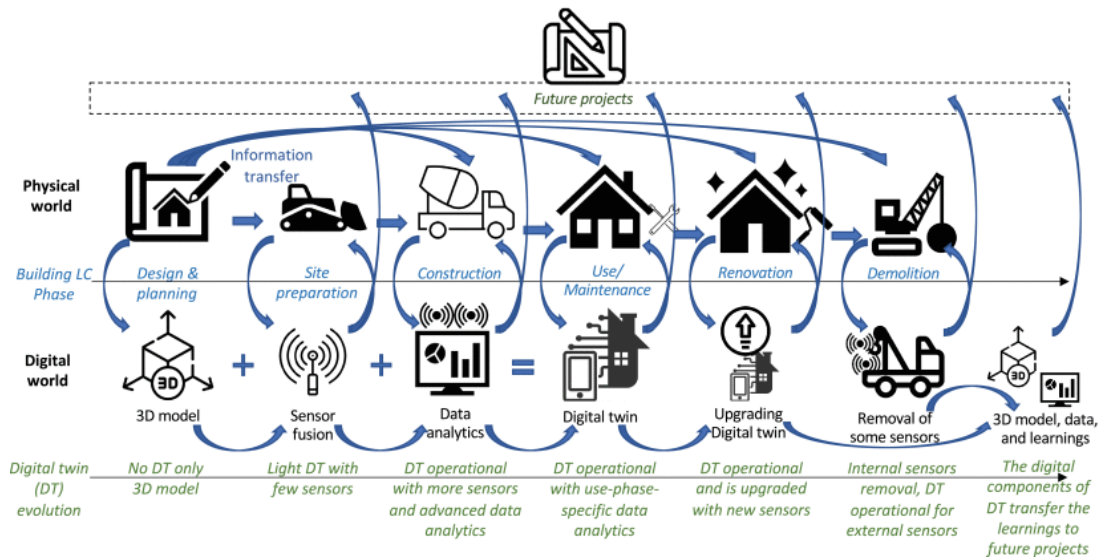
Ainda na linha de canteiro de obras, o estudo de Chacón *et al.* (2024) expôs um estudo de caso de um edifício durante a etapa de sua construção. Uma sequência de medições e análises foram realizadas a fim de compreender diversos aspectos durante a construção, que envolvia a estrutura em concreto, sendo estes (Chacón *et al.*, 2024):

- Deformação do concreto: Comparar com o modelo do projeto (sensores).
- Rastrear a posição do balde: Entender a produtividade (sensores, AM).
- Deflexão das lajes: Comparar os dados adquiridos posteriormente (*laser scanner*) com as análises realizadas no modelo durante a etapa de projeto.
- Temperatura do concreto: Medir variação de temperatura durante a cura do concreto para prever a evolução de sua resistência (sensores, método de maturidade ASTM C1074).
- Andamento da obra: O aplicativo registrava o progresso das tarefas realizadas na obra (plataforma IoT).
- Vibração do concreto: Monitorar as vibrações (sensor).

Chacón *et al.* (2024), percebem proveito dos dados integrados ao GD, para otimizar a execução do projeto. Essa fonte de informação quando compartilhadas de modo interoperável melhoram a visibilidade para tomada de decisão, mas, os dados devem ser fornecidos em tempo oportuno para serem adotados ainda na fase de execução, o que nem sempre será fácil de alinhar com a equipe (Chacón *et al.*, 2024).

Khajavi *et al.* (2023), abordam a segurança ao longo do ciclo de vida das edificações com destaque especial para incêndios e detecção de anomalias. Esta aplicação de GD possibilita o monitoramento realizando o registro de dados úteis para agilizar a detecção de focos de incêndio, permitindo o planejamento de rotas de fuga, simulando a fim de gerar estratégias para evitar grandes perdas (Khajavi *et al.*, 2023). Segundo os autores, podem existir desafios para adoção dos GD pela falta de compreensão e aceitação das novas tecnologias, além da ausência de regulamentação. A Figura 13 ilustra como os autores entendem o uso do GD em cada fase do ciclo de vida da edificação:

Figura 13 – “As fases do ciclo de vida do edifício e o impacto do gêmeo digital sobre elas, juntamente com a interação dinâmica entre essas fases nos domínios digital e físico” (Khajavi *et al.*, 2023, p. 52347, tradução nossa).



Fonte: Khajavi *et al.* (2023), licença: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/> , via IEEE.

No contexto de logística de construções modulares Lee e Lee (2021), descrevem como benéfico o uso do GD, os autores realizaram simulações para estimar rotas envolvendo diferentes riscos como: altura máxima de veículos, dimensões das vias, peso suportado em pontes, topografia e etc. Com a atualização em tempo real no GD considerando o uso de sensores IoT (hipotéticos) para rastrear a localização, foi relatada uma redução muito significativa na quantidade de horas (157,5 h em comparação com método convencional). Neste caso, a gestão pode se beneficiar na definição de rotas alternativas, estimativa de custo do combustível, rotas de conexão com armazéns, organização da produção, envio, alteração no cronograma de execução no canteiro de obras, entre outros (Lee; Lee, 2021).

Em um cenário ideal, a simulação é adotada ainda na fase de planejamento, mas, quando é trabalhada em edificações construídas, também tem a capacidade de trazer outras perspectivas para melhorar o desempenho ambiental das edificações. Zhao *et al.* (2021) descrevem que o uso da simulação otimizou a posicionamento de módulos fotovoltaicos na edificação estudada, ampliando a geração de energia que, neste caso, é trabalhada na perspectiva de *retrofitting* e nZEBs (edifícios de balanço energético quase zero). Evangelou, Gkeli e Potsiou (2022) trazem um estudo de caso voltado à análise de eficiência energética. Seu GD é capaz de monitorar o consumo

de energia de um conjunto habitacional, fornecendo dados atualizados que auxiliam a gestão a traçar estratégias para otimizar o consumo.

Com a proposta de otimizar o processo de manutenção predial de ambientes universitários, Fialho *et al.* (2022), desenvolvem um protótipo de um sistema de iluminação integrando a abordagem BIM e IoT direcionando a manutenção preditiva. Os testes são realizados em um quarto residencial com a integração de sensores em uma luminária. O projeto consegue apoiar a tomada de decisão centralizando os dados, registrando e emitindo alerta aos interessados, o que possibilita um planejamento eficiente na realização de manutenção (Fialho *et al.*, 2022).

De acordo com Schrotter e Hürzeler (2020), há um potencial na divulgação pública do modelo 3D da cidade sobre *Open Government Data*<sup>10</sup>, para o desenvolvimento de plataformas, o que permite não só soluções de planejamento elaboradas pelo setor público, mas também iniciativas privadas.

Em sistemas mais amplos, como GD de cidades inteligentes, concentrar informações em um único lugar pode não ser a opção mais segura, uma vez que essa fonte de dados direciona um foco para encontrar fragilidade no sistema de segurança. Poderia ser mais interessante, neste contexto, que cada departamento responsável por alguma camada da cidade faça a verificação de sua devida área de atuação, com seu GD, o que não limita a existência do mesmo modelo digital como base comum ou a possibilidade de divulgação pública como mencionado por Schrotter e Hürzeler (2020).

Em resposta ao contexto de desastres naturais ou situações críticas que demandam agilidade, a ideia dos GDs também é explorada. White *et al.* (2021) descrevem o exemplo de uma operação de resgate na Tailândia onde o uso do GD forneceu informações relevantes sobre a região, e as simulações realizadas permitiram traçar estratégias com objetivo de ampliar a segurança e as chances de sucesso na missão. Sobre GDs para resiliência climática, Riaz, McAfee e Gharbia (2023) abordam os seguintes desafios e limitações:

---

<sup>10</sup> De acordo com Schrotter e Hürzeler (2020), o conceito *Open Government Data* é entendido como a disponibilização acessível de dados administrativos, sendo essencial para infraestrutura de cidades digitais, e guiado sobre o princípio “aberta por padrão”.

- Ausência de trabalhos de implementações reais: Está relacionado a desafios técnicos, necessidade de dados de alta qualidade, integração adequada e limitações de *hardware* e *software*.
- Falta de compreensão e conscientização: As partes interessadas não conseguem entender os benefícios do uso de GD neste contexto.
- Financiamento: Escassez de financiamentos para pesquisas.
- Desafios sociais e éticos: Privacidade e segurança dos dados, propriedade e compartilhamento de dados (conflito de interesses), acesso desigual.
- Complexidade tecnológica e erros não intencionais: Erros ou preconceitos capazes de impactar a sociedade e o meio ambiente.

A participação dos habitantes das cidades também aparece em relação ao planejamento. Para Schrotter e Hürzeler (2020), iniciativas de GD em ferramentas gamificadas podem contribuir, com o intuito de engajamento, os mais jovens a fazerem proposições para áreas das cidades. Para Dani *et al.* (2023), os apontamentos dos cidadãos podem ser levados em consideração nas tomadas de decisões.

Na gestão do patrimônio, Karatzas *et al.* (2024) descrevem como relevante que os GDs adotem uma abordagem sociotécnica, em que não somente dados técnicos, como os coletados pela IoT, por exemplo, são usados nas tomadas de decisões, mas as percepções dos ocupantes dos espaços com toda sua bagagem culturais.

Os dispositivos móveis (IoT) fornecem um outro recurso para disponibilização de dados de forma colaborativa. Segundo White *et al.* (2021), além dos dados coletados por sistemas implantados na cidade (iluminação, câmeras de segurança), os cidadãos, por meio de seus dispositivos móveis pessoais, podem compartilhar dados relevantes que auxiliem as ações das autoridades municipais. Riaz, McAfee e Gharbia (2023) falam sobre sensoriamento social em que dados de mídias sociais complementam os dados adquiridos por sensores físicos.

Para Sharifi *et al.* (2024), o GD permite aos planejadores avaliarem o impacto de intervenções urbanas, onde, por meio das simulações, é possível compreender as futuras dinâmicas associadas à mobilidade urbana em suas diferentes camadas. Como exposto no exemplo de Lee *et al.* (2022), dados de tráfego são viáveis de serem coletados por câmeras e também por veículos que possuem conectividade (White *et al.*, 2021).

É notório que para o caso de aplicação, o potencial do “GD” (IoT, IA, dentre outros) é mais significativo quando associado aos ambientes construídos de grande

porte ou que abarque atividades específicas. Pois, o custo para implantar e manter a infraestrutura de um “GD” pode demandar recursos de *software* e *hardware* além da necessidade de atualização e de profissionais capacitados, haja visto a quantidade de processos envolvidos ao longo do desenvolvimento e registro de dados (Agostinelli *et al.*, 2021; Bortolini *et al.*, 2022). Em Peng *et al.* (2020), o custo aparece entre desafios que necessitam de atenção:

Os riscos financeiros ainda são consideráveis ao utilizar GD amplamente em projetos de construção. Estabelecer um GD envolve a construção em larga escala de redes para sensores inteligentes, câmeras, comunicação sem fio, etc. Sem um planejamento cuidadoso no início da fase de design, será muito difícil ou até mesmo impossível adicionar esses dispositivos de hardware a um projeto de construção já concluído. Centros de controle para o sistema de gestão também são caros. Portanto, os proprietários devem ter forte motivação e visão clara. Um projeto deve empregar tecnologias GD sem hesitação se forem comprovadamente benéficas financeiramente (Peng *et al.*, 2020, p. 12, tradução nossa).

No caso do hospital 24 horas em Xangai, trazido por Peng *et al.* (2020), um GD é relevante para otimizar o tempo de manutenção. O processo de gestão da edificação torna-se mais fluido na medida que as manutenções não interferem nas atividades desempenhadas, e os dados estão em constante atualização (Peng *et al.*, 2020).

Em Ni *et al.* (2025), descrevem um GD paramétrico de uma edificação histórica (Castelo), onde foram instalados cerca de 13 dispositivos IoT com 84 sensores coletando dados de umidade, temperatura e qualidade do ar. Os autores constataram que o sistema de monitoramento foi relevante para detectar áreas do edifício que demandam atenção, pois afetam tanto sua materialidade como a permanência na edificação.

Em suma, no processo de gestão do ambiente construído com uso de GDs os profissionais podem se beneficiar de diferentes formas. Na gestão dos projetos, o processo de simulação fortalece o entendimento, concedendo oportunidades de explorar diversos cenários ainda na fase de planejamento (Sharifi *et al.*, 2024; White *et al.*, 2021; Zhao *et al.*, 2021).

Na gestão dos ativos o monitoramento eficaz com dados atualizados trabalha em alinhamento na otimização a fim de prevenir eventuais falhas, avaliar as condições de desempenho e manutenção de equipamentos presentes na infraestrutura urbana,

detecção de incêndios e anomalias (Khajav *et al.*, 2023; Peng *et al.*, 2020; Sharifi *et al.*, 2024).

Na gestão operacional, realizando o monitoramento da logística no canteiro de obras, insumos, cronograma, implementando mudanças estratégicas com base em dados (Evangelou; Gkeli; Potsiou, 2022; Jiao *et al.*, 2024). Na segurança, para análises de riscos, controle de acesso, orientações, além de compreensão das causas de incidentes em canteiros de obras a fim de prevenir situações similares (Khajav *et al.*, 2023). No espaço urbano para simular o tráfego de veículos em possíveis intervenções com a finalidade de melhorar a mobilidade (Sharifi *et al.*, 2024; Jiao *et al.*, 2024); na eficiência energética para reduzir o consumo de energia em edificações (Evangelou; Gkeli; Potsiou, 2022; Zhao *et al.*, 2021).

Portanto os GDs, subsidiados pelos dados coletados via IoT são úteis para proporcionar um ambiente de construção inteligente, onde o monitoramento contínuo, a análise detalhada e a capacidade de simulação e previsão trabalham juntas para melhorar o desempenho ambiental das edificações.

#### 4.1.2 Ferramentas

Os *softwares* desempenham um papel importante na produção de GDs e, portanto, nesta seção, a partir da revisão da literatura, as ferramentas que foram utilizadas nos estudos de caso ou mencionadas serão expostas descrevendo as observações trazidas pelos autores.

O Quadro 2 apresenta as tecnologias e ferramentas identificados nas aplicações em estudos de caso, indicando as ferramentas/*softwares* usados na coleta e comunicação de dados, modelagem e visualização do GD, dividido da seguinte forma: (1) Percepção: Sensores, atuadores, microcontroladores; (2) Rede/Dados: Conectividade, Armazenamento, Processamento; (3) Digital/Aplicação: Ferramentas usadas para criar, visualizar, simular e interagir com o modelo digital.

Quadro 2 - Ferramentas utilizadas no desenvolvimento de GDs, com indicação dos autores e país de vínculo institucional.

(continua)

<b>Autores</b>	<b>Ano</b>	<b>País (vinc. autores)</b>	<b>Assunto</b>	<b>Percepção</b>	<b>Rede/Dados</b>	<b>Digital/Aplicação</b>
Agostinelli <i>et al.</i>	2021	Itália.	Gestão energética em edifícios.	Sensores (Voltímetro; amperímetros; temperatura e umidade), e atuadores.	WiFi e <i>Bluetooth</i> 4.2 BLE; <i>Edge Computing</i> .	<i>Autodesk InfraWorks; Autodesk Revit; Mc4 software</i> (com o Revit), <i>ArchiEnergy, Termus BIM</i> . IA e AM, GIS. <i>Computational Fluid Dynamics</i> .
Agouzoul <i>et al.</i>	2021	Marrocos e França	Eficiência energética.	-	Site com dados meteorológicos (no <i>Revit</i> ).	<i>Autodesk Revit, Insight</i> .
Araújo <i>et al.</i>	2019	Brasil	Integração de modelos físicos com modelos BIM.	ESP8266 NodeMCU (microcontrolador), sensor de presença PIR DYP-ME003; sensor LDR, led.	Via Wi-Fi; <i>Firestore Realtime, Database</i> ; HTML e <i>NodeJS</i> (Protocolo).	<i>Autodesk Revit Architecture; Autodesk Platform Services</i> (antiga <i>Autodesk Forge</i> ); <i>Website</i> .
Bolpagni <i>et al.</i>	2023	Londres e Itália	Gestão.	Sensores PIR; <i>Indoor Mobile Mapping Survey</i> (iMMS).	Banco de Dados.	<i>Autodesk Revit Architecture; Oasys MassMotion; Autodesk AutoCad; Unity; PowerBi</i>
Lee <i>et al.</i>	2024	Coreia	Hospital.	-  (Possibilidade sensores de <i>smartphones</i> ).	OGC <i>IndoorGML IndoorH</i> (OGC <i>IndoorGML</i> ).	<i>InCOVID +; SIMOGEN; SketchUP; TICA</i> (triangle-based <i>IndoorGML construction authoring tool</i> ) – Produzido pelos autores.
Chacón <i>et al.</i>	2024	Espanha	Construção de edifícios.	Sensores: Acelerômetro; giroscópio; GPS; barômetro. câmera (registrar o processo); <i>strain gauge</i> (PL-90-11); <i>Terrestrial Laser Scanner</i> (TLS); <i>Thermocouples K</i> ; sensor DS18B20.	<i>Knowledge Graphs</i> (banco de dados). Protocolo HTTPS; CSV + <i>Mainflux</i> (IoT). Algoritmos AM ( <i>Naive Bayes, Decision Tree, k-nearest neighbor, support vector machine e Random Forest</i> ); <i>Scripts Python</i> .	<i>Interface: Unity, IFC. Karamba 3D + Grasshopper; Scripts Python + Grasshopper</i> .

(continua)

<b>Autores</b>	<b>Ano</b>	<b>País</b>	<b>Assunto</b>	<b>Percepção</b>	<b>Rede/Dados</b>	<b>Digital/Aplicação</b>
Conde <i>et al.</i>	2022	Espanha	Estacionamento inteligente.	Sensores IoT lâmpadas (Atuadores) Protocolo <i>Ultralight</i> 2.0.	FIWARE (IoT <i>Agents</i> , <i>Draco</i> , <i>Cosmo</i> ); MongoDB.	3D <i>mobile application</i> ; FIWARE ( <i>Orion Context Broker</i> , <i>Keyrock</i> , <i>Wilma</i> PEP Proxy, <i>AuthZForce</i> )
Dani <i>et al.</i>	2023	Indonésia	Cidades Inteligentes.	Sensores; câmeras CCTV.	<i>OpenstreetMap</i> ; <i>Shapefile</i> (GIS); <i>Unity Engine</i> .	<i>Blender</i> , <i>Unity Engine</i> .
Evangelou, Gkeli e Potsiou	2022	Grécia	Conjunto habitacional.	Sensores: Consumo elétrico; temperatura da água quente; temperatura do ambiente; umidade relativa; intensidade do vento; câmeras e microfones; website ( <a href="http://www.okairos.gr">www.okairos.gr</a> ) Menção: <i>Cesium</i> ; <i>PostgreSQL</i> .	Armazenamento: Arquivos .csv; <i>Google Sheets</i> . Conectividade: <i>Google Drive</i> , <i>SheetGo</i> ; Processamento: <i>Google Sheets</i> (JavaScript); <i>Unreal Engine</i> .	<i>Autodesk Revit 2022</i> ; <i>Unreal Engine 4.27</i> ; <i>Datasmith (plugin)</i> ; <i>Blueprint nodes</i> ; <i>Google Sheets Script</i> .
Fialho <i>et al.</i>	2022	Brasil, Inglaterra	Iluminação em ambiente universitário.	MCU (Microcontrolador); Sensor LDR; retificador; relé, resistor; lâmpada.	Repositório em nuvem (LaSDPC / ICMC / USP) <i>PostgreSQL</i> ; <i>MongoDB</i> .	Sistema SmartLab aplicativo móvel; conta de e-mail; <i>Autodesk Revit 2021</i> ; <i>Autodesk online viewer</i> ; <i>Dynamo</i> . <i>CAFM software</i> .
Fonseca <i>et al.</i>	2023	Brasil	Edificação.	Sensores (Pesquisa em andamento).	-	<i>Autodesk Revit</i> (Pesquisa em andamento).
Hadjidemetriou <i>et al.</i>	2023	Chipre	Edificação.	Sensores.	APIs para coleta de dados; <i>ThingSpeak</i> ; MQTT e HTTP REST APIs; <i>MATLAB</i> .	<i>EnergyPlus</i> ; <i>Ansys Fluent</i> ; <i>MATLAB</i> ; <i>App Designer</i> ; <i>Grafana</i> ; <i>Revit</i> ; <i>AutoCAD</i> ; <i>Controle HIL</i> .
Jiao <i>et al.</i>	2024	China	Monitoramento preventivo de riscos.	Câmeras, sensores de posicionamento portáteis, sensor Alpha Prime ( <i>LiDAR</i> ).	<i>Edge Computing</i> , ROS (sistema operacional); MQTT; <i>Cloud Computing</i> .	Rede Neural Profunda (IA/CNNs – <i>Convolutional Neural Network e Transformer</i> ); Modelo LSTM-based; BEV ( <i>birds-eye-view</i> ).

(continua)

Autores	Ano	País	Assunto	Percepção	Rede/Dados	Digital/Aplicação
Kalantari <i>et al.</i>	2022	Estados Unidos da América	Protótipo para <i>layout</i> arquitetônico.	Placas (com microcontrolador); conectores magnéticos de seis pinos; pinos tipo pogo; circuito divisor de tensão.	Protocolo I <sup>2</sup> C ( <i>Inter Integrated Circuit</i> ); Comunicação sem fio ( <i>wireless</i> ); placa mãe (comunicação USB com computador).	<i>Grasshopper</i> (Rhinoceros 3D); <i>Alternative Design Suggestion</i> (Componente de <i>software</i> desenvolvido pelos autores); programação C#.
Khajavi <i>et al.</i>	2023	Finlândia, Alemanha	Monitoramento de incêndios e anomalias.	Câmera térmica de curto alcance sensor UV; câmera RGB; sensor de movimento <i>Raspberry Pi 4</i> câmera infravermelha; sensor térmico de longo alcance; sensor de temperatura interno; dados meteorológicos (terceiros).	<i>REST API</i> ; Microsoft Azure; Processamento local; análise de dados (algoritmos).	<i>Blender</i> ; <i>Unity</i> ; <i>WebGL</i> ; dashboard web; simulação de propagação de fogo; <i>Front-end</i> ( <i>Typescript</i> <i>Vue.js</i> ; <i>HTML</i> e <i>CSS</i> ). “office Snaps” (pacote <i>Unity</i> ).
Lee e Lee	2021	Estados Unidos da América	Logística de construções modulares.	Sensor IoT: GPS (Hipotético) (Estudo de caso simulado).	<i>JSON</i> ; <i>Application Gateway</i> ; Bing Maps API; Back-end; (Estudo de caso simulado).	<i>Unity</i> ; <i>BIM</i> ; <i>GIS</i> ; <i>Web Front-End</i> . (Estudo de caso simulado).
Lee <i>et al.</i>	2022	Coreia	Mobilidade.	Câmeras CCTV; NVR ( <i>Network Video Recorder</i> ); sensores Multimodais.	<i>RTSP</i> ( <i>Real-Time Streaming Protocol</i> ); servidor de dados UDT; módulo de objetificação; análise de dados multimodal; compactação via <i>Curve Fitting</i> .	<i>Unity 3D</i> ; <i>VWorld</i> ; Sistema de Coordenadas Esférico; <i>SiamMOT</i> .
Lehner e Dorffner	2020	Áustria	Cidade.	-	Banco MZK; <i>CityGML</i> ; <i>imagem-matching</i> .	<i>3dfier</i> ; <i>CityGRID</i> ; <i>BREC</i> ; <i>VarCity Project</i> ; <i>CIM</i> .
Lyra, Katakura e Martins	2022	Brasil	Edificação.	Sensores	Projeto <i>Smart Campus</i> Mauá.	<i>Autodesk Revit Architecture</i> . <i>Autodesk Platform Services</i> (antiga <i>Autodesk Forge</i> ).

(continua)

Autores	Ano	País	Assunto	Percepção	Rede/Dados	Digital/Aplicação
Mariano <i>et al.</i>	2023	Brasil	Monitoramento de encostas e áreas de risco.	Arduino Mega 2560; Arduino Uno Rev.3; sensor de Umidade do solo (Higrômetro); sensor de rotação modulo Encoder Rotativo KY-040; <i>Jumpers</i> ; <i>Power Bank</i> .	Antena de Rádio (Módulo NRF24L01); <i>Processing</i> .	<i>Rhinoceros/ Grasshopper + Firefly (plugin)</i> .
Martins e Lyra	[2022?]	Brasil	Biblioteca.	Sensores	IMT Network Server (do local de pesquisa) + <i>LoraWAN</i> ; <i>Node-RED</i> ; <i>MongoDB</i> .	<i>Autodesk Revit Architecture</i> ; <i>Autodesk Platform Services</i> (antiga <i>Autodesk Forge</i> ); dashboards
Martins <i>et al.</i>	2022	Portugal	Escritório.	Espressif ESP32; Texas Instruments HDC1080; Leica BLK360.	<i>InfluxDB</i> .	<i>Autodesk Revit Architecture</i> <i>Autodesk Platform Services</i> (antiga <i>Autodesk Forge</i> ).
Miller <i>et al.</i>	2021	Singapura	Conforto Interno.	<i>Smartwatches</i> ; sensores internos e externos; <i>Bluetooth Beacons</i> ; Drones.	5G; tecnologia de terceiros ( <i>middleware</i> , serviços de função <i>Lambda</i> ); Banco de dados de series temporais.	BIM; GIS; BEM; Plataforma <i>Cozie</i> e aplicativo bluetooth; visualização (dashboards, ...)
Mohammadi, Vimal e Taylor	2020	Geórgia	Campus Universitário (Cidades Inteligentes).	Sensores IoT internos; Sensores externos; social <i>sensing</i> (redes sociais).	APIs (AoT HTTP API); Web portals (Georgia Tech, <i>EnergyWatch</i> ); Twitter API; AR ( <i>CitySnap</i> ); <i>Structured Query Language</i> (SQL)	<i>Unity</i> , aplicativo <i>CitySnap</i> .
Nhamage	2023	Portugal	Fadiga em pontes ferroviárias metálicas.	-	<i>MATLAB</i> ; <i>ANSYS</i> ; <i>API</i> <i>Dynamo</i> .	<i>Autodesk Revit Architecture</i> .

(continua)

<b>Autores</b>	<b>Ano</b>	<b>País</b>	<b>Assunto</b>	<b>Percepção</b>	<b>Rede/Dados</b>	<b>Digital/Aplicação</b>
Ni <i>et al.</i>	2022	Suécia	Edifícios históricos.	<p>Arduino Uno Rev3 SMD + Grove Base Shield V2.</p> <p>Dispositivos de detecção: DHT22; MH-Z16; PPD42NS; MIKOE-1630; Grove-Piezo.</p>	<p>Raspberry Pi CM3 (Single board computers) + Dev Kit.</p> <p>ZTE MF833V (modem USB/banda larga móvel); Microsoft Azure Services (Azure IoT Hub, Azure SQL Database; Azure Blob Storage; Azure App Service).</p>	Azure Web App Service Azure Digital Twins; RealEstateCore;
Ni <i>et al.</i>	2025	Suécia	Edifício histórico.	<p>Sensores: AHT20 (temperatura e UR); MH-Z16 (CO2); PPD42NS (Partículas de poeira); LM358 (Ruido); TSL2591 (Luz); UR18.DA0.2-UAMJ.9SF (ultrassônicos) Raspberry Pi 3 Modelo B+ e USB modem.</p>	<p>Wi-Fi, 4G, Azure SQL Database; ontologia Brick, Edge computing.</p>	Ontologia Brick, Aplicativos web (Python + Pandas + Dash Bootstrap Components).
Pan e Zhang	2021	Singapura	Gestão de projetos.	<p>Dispositivo IoT: Sensor LiDAR + Drones (dados transferidos direto para BIM Cloud).</p>	<p>IoT; BIM Cloud; Real-Time and Automated Monitoring and Control (RAAMAC); IFC Logger.</p>	BIM; Disco Fuzzy; ARIMAX; Petri Nets; BPMN; ProM.
Passos <i>et al.</i>	2022	Brasil	Monitoramento de água (residência).	<p>ESP8266 NodeMCU (Microcontrolador); sensor de fluxo de água.</p>	<p>Plataforma Blynk.io; Processing.</p>	Autodesk Revit Architecture, Rhinoceros/ Grasshopper + VisualARQ + Rhino.Inside Revit.
Peng <i>et al.</i>	2020	China	Hospital.	<p>Sensores.</p>	<p>Apache Kafka; Apache flink; nuvem privada.</p>	Desenho 2D; nuvens de pontos; modelagem BIM; realidade mista.

(continua)

<b>Autores</b>	<b>Ano</b>	<b>País</b>	<b>Assunto</b>	<b>Percepção</b>	<b>Rede/Dados</b>	<b>Digital/Aplicação</b>
Steinmetz <i>et al.</i>	2022	Germânia, Brasil, Índia.	Serviço de veículo.	(Simulação)	(Simulação)	<i>Carla simulator + Node-RED</i>
Tagliabue <i>et al.</i>	2021	Itália	Edifício educacional.	-	<i>Microsoft Excel; DiRoots ParaManager; DiRoots SheetLink; Banco de dados em nuvem.</i>	<i>Autodesk Revit Architecture 2021; Dynamo (VPL); Autodesk Insight; Autodesk Green Building Studio; PVGIS; Bionova One Click LCA, EPDs (Environmental Product Declarations).</i>
Toledo <i>et al.</i>	2024	Brasil	Restauração de casa sede de assentamento rural.	-	-	Câmera 360°; estação total e RTK; trenas eletrônicas/convencionais. plataforma <i>Matterport</i> , câmera 360°; <i>AutoCAD; Civil 3D; QGIS.</i>
Trento, Wurzer e Coraglia	2023	Roma	Fluxo de pessoas em edifícios históricos.	Sensores simulados atuadores virtuais; Câmera 360°, Estação Total	Simulada via arquivos compartilhados ( <i>middleware</i> ).	<i>Autodesk Revit; Dynamo (Revit); NetLogo (Agent-Based Simulation - ABS).</i>
White <i>et al.</i>	2021	Irlanda	Cidades Inteligentes.	-	5G, Portais de dados públicos (ex: <i>Dublinked</i> ), <i>SUMO, Scripts de flocking.</i>  Mapa de solo.	<i>Unity, SUMO, Modelos BIM. Modelo FBX (Portais de dados públicos) Dublin Docklands.</i>
Zhao <i>et al.</i>	2021	China e Singapura	Eficiência energética.	-	-	<i>Autodesk Revit; DesignBuilder.</i>

Fonte: Elaborado pela autora (2024 -2025).

É notória, no Quadro 2 a multiplicidade de ferramentas utilizadas no desenvolvimento de GDs, tendo em vista a variação de aplicação das soluções.

Em sua pesquisa Cespedes-Cubides e Jradi (2024) citam algumas ferramentas comerciais que fornecem serviços para criar GD da construção. Os autores apontam que todas essas, segundo a visão de Kritzinger *et al.* (2018), se enquadram na integração de dados como Sombras Digitais. Algumas informações sobre as tecnologias mencionadas pelos autores são expostas no Quadro 3.

Quadro 3 - Ferramentas comerciais mencionadas por Cespedes-Cubides e Jradi (2024).

<b>Ferramentas</b>	<b>Tecnologias</b>	<b>Empresa ou Desenvolvedores</b>
<i>Neuron</i>	IA; AM; 5G; IoT; BIM.	<i>Arup</i>
<i>Grandlund Manager's Digital Twin</i>	BIM; IoT;	<i>Granlund Manager</i>
<i>Autodesk Tandem</i>	BIM; Nuvem;	<i>Autodesk</i>
<i>Building Twin</i>	BIM;	<i>Siemens</i>
<i>Connecting Building Services</i>	Azure;	<i>Bosch</i>
<i>Bimsync Arena</i>	BIM;	<i>Catenda Hub</i>

Fonte: Elaborado pelo autora, baseado nos dados trazidos em Cespedes-Cubides e Jradi (2024).

Na análise de integração de dados dos estudos revisados por Cespedes-Cubides e Jradi (2024), com ênfase na fase de operação em aplicações práticas, foram identificadas cerca de 21 publicações, sendo: 4 com nível de integração como modelo digital, 14 de nível sombra digital e 3 de nível Gêmeo Digital. Uma observação é que a visão de Kritzinger *et al.* (2018) sobre essa classificação compreende que o Gêmeo Digital teria esses três tipos de integração de dados como subcategoria e, portanto, isso não especifica que a ausência de algum desses tipos não seria reconhecida com um GD por não alcançar o último estágio de integração.

Em relação ao uso conjunto dos *softwares Autodesk Revit* com o *Forge* (atual *Autodesk Platform Services*), apresentados nos estudos de Lyra, Katakura e Martins (2022), Martins e Lyra [2022?] e Araújo *et al.* (2019), ambos são licenciados pela empresa Autodesk. Apenas o trabalho de Araújo *et al.* (2019) faz menção específica ao uso em conjunto das ferramentas, destacando o potencial de comunicação da API *Forge* com o modelo *Revit*.

De acordo com Passos *et al.* (2022), uma das dificuldades relatadas foi relacionada a padronização de processos devido ao uso de múltiplos *softwares* para

alcançar funcionalidades específicas. Isso foi refletido na necessidade de utilização de *plugins* como *Rhino. Inside Revit*, para linkar o *Revit* e *Grasshopper*, o que, com o uso do *Rhinceros* com *Grasshopper* e o *plugin VisualARQ*, ocorreu de forma mais amigável em um único *software* (Passos *et al.*, 2022).

Kalantari *et al.* (2022) também utilizam *Rhinceros/Grasshopper* no protótipo de interação físico-digital. Entre as vantagens citadas dessa abordagem, está a possibilidade de ampliar opções nas análises do modelo digital ao utilizar recursos de simulação de eficiência energética. Em relação à comunicação, realizaram uma avaliação para usar a transferência de dados sem fio nas placas que fazem a conformação do *layout* arquitetônico (protótipo), porém, essa opção foi inviável devido ao custo (quantidade) e a complexidade (Kalantari *et al.*, 2022).

Galvão *et al.* (2023) focam em BIM e GD no monitoramento estrutural. O trabalho apresenta uma pesquisa exploratória, descritiva e explicativa. Um exemplo de uso integrado é exposto incluindo a técnica *Structural Health Monitoring* (SHM). Apesar de trazer esquemas gráficos (ex.: diagramas de casos de uso) e indicar as ferramentas, o trabalho não expõe detalhes sobre uma execução concreta. Os elementos mencionados foram:

- Modelagem Digital: *Autodesk Revit Architecture*; *API Dynamo (Revit)*.
- Banco de dados: RDBMS (*Relational Database Management System*) e MySQL.
- Tecnologia de comunicação: Wi-Fi.
- Linguagem de programação: PHP (*Hypertext Preprocessor*).
- Dispositivos eletrônicos: Arduino (Microcontrolador), sensor de distância e o Módulo de transmissão Wi-Fi.

Sobre o motor de jogos *Unity*, nota-se o emprego mais recorrente nos estudos que envolvem GD em escalas mais amplas para contextos urbanos. A motivação se concentra na capacidade de usar dados provenientes de múltiplas fontes, além de aspectos de visualização que podem, inclusive, envolver Realidades Estendidas (Dani *et al.*, 2023; Lee *et al.*, 2022; Mohammadi; Vimal; Taylor, 2020).

A *Unreal Engine* é outro motor de jogos que marca presença no estudo de caso de Evangelou, Gkeli e Potsiou (2022). Segundo os autores, a conexão entre o modelo BIM produzido com o *Revit* e a *Unreal Engine* é feita via *Datasmith*, e a atualização do modelo ocorre mutuamente, sendo que a interação na *Unreal Engine* mantém as

informações características do modelo do *Revit*. Nesse caso, os dados dos sensores foram direcionados a *Unreal Engine*. Um dos pontos também abordados pelos autores é que o uso desse motor de jogos não é muito amplo, mas há expectativas futuras de que outros *plugins* sejam criados e capazes de agilizarem processos (Evangelou; Gkeli; Potsiou, 2022).

O *OpenStreetMap* também é utilizado nesse contexto. Segundo Dani *et al.* (2023), seu uso, em conjunto com *shapefiles* (*Geographic Information System - GIS*), é útil para obter dados da cidade adequados e atualizados. Em White *et al.* (2021), o *OpenStreetMap* não é usado no experimento, porém, é citado como possibilidade de adição de dados urbanos na criação dos GDs de cidades inteligentes.

Um dos comentários trazidos por Lee *et al.* (2022), que realiza uma pesquisa sobre GDs urbanos, expõe sobre a limitação do uso de dados georreferenciados atrelados à capacidade da ferramenta *Unity* de receber o tipo de dado: Ponto flutuante (*float*), que representa valores com casas decimais.

“No mecanismo Unity3D, todos os valores de GameObject—unidades básicas usadas no Unity3D para representar personagens, objetos e paisagens, e que atuam como contêineres para todos os componentes do projeto—podem ser armazenados apenas no tipo float. Valores com mais de seis a nove dígitos no tipo float são aproximados; isso limita o tamanho de um mapa que pode ser usado em um projeto Unity3D (Lee *et al.* 2022, p. 10, tradução nossa)”.

Lee *et al.* (2022) também apontam outras observações em relação à transmissão e ao processamento de dados das câmeras CCTV, pois há ausência de padronização entre os fabricantes em relação à interface. Por isso, foi necessário desenvolver módulos específicos para lidar com esses dados. Outra observação foi a necessidade de uma maneira eficaz de filtrar e processar grandes volumes de dados, avaliando e mantendo os mais relevantes (Lee *et al.* 2022).

Sharifi *et al.* (2024) fazem menção a três cidades que estão adotando Gêmeos Digitais. As ferramentas citadas no texto referentes à cidade de Helsinque, na Finlândia, são apresentadas no Quadro 4:

Quadro 4 - Ferramentas mencionadas por Sharifi *et al.* (2024) sobre o GD de Helsinki (Finlândia).

Ferramentas	Aplicação	Empresa ou Desenvolvedores
<i>Bentley OpenCities Map</i>	Modelagem (Terrenos, edifícios e infraestrutura)	<i>Bentley Systems</i>
<i>Bentley OpenCities Planner</i>	Simulação (vento, luz, e etc.).	<i>Bentley Systems</i>
<i>Bentley Context Capture4 for 3D</i>	Escaneamento a laser e modelagem.	<i>Bentley Systems</i>
<i>CityGML</i>	Modelagem (Terrenos, edifícios e infraestrutura).	<i>Open Geospatial Consortium</i>
<i>ANSYS Discovery Live</i>	Simulação (vento, luz, e etc.).	<i>Ansys</i>

Fonte: Elaborado pela autora, baseado nos dados trazidos em Sharifi *et al.* (2024).

Riaz, McAfee e Gharbia (2023) realizam uma revisão da literatura com intuito de identificar tecnologias que estão sendo implementadas na criação de GD para eventos climáticos extremos. Os dados foram compilados em três categorias, aqui são expostas duas destas nos Quadro 5 e 6. A primeira dessa visa a produção de modelos 3D de cidades. De acordo com os autores, as ferramentas *CityGML*, *Sketchup* e *ArcGIS* apareceram de modo mais recorrente, e o *CityJSON* também é apontado por sua facilidade de integração web (Groenendyk, 2013 *apud* Riaz; McAfee; Gharbia, 2023). O Quadro 5 simplifica as informações trazidas agrupando por tema. Para mais detalhes, consultar publicação (acesso aberto) de Riaz, McAfee e Gharbia (2023):

Quadro 5 – Ferramentas para produção de Modelos 3D em Riaz, McAfee e Gharbia (2023).

Tema	Ferramentas Utilizadas	Softwares
Inundações	Integração GIS com <i>Geodesign</i> ; Modelagem baseada em regras; dados <i>LIDAR</i> ; DTM; mapeamento de textura; <i>CityGML</i> ; nuvem de pontos 3D; imagens aéreas (UAV); varredura a laser terrestre e aérea; <i>VirtualcityMAP</i> ; <i>Web 3D GIS</i> ; <i>WebGL</i> ; <i>X3D</i> ; <i>X3DOM</i> ; <i>GeoServer3D</i> ; <i>jQuery</i> ; visualizações com <i>FZK viewer</i> e <i>Cesium</i> .	<i>ArcGIS Pro 2.0</i> ; <i>CityEngine 2017.0</i> ; <i>ArcGIS Pro 10.3</i> ; <i>SketchUP</i> ; <i>ArcMap</i> ; <i>Hancel (Hancor Office)</i> ; <i>SQL + software GIS</i> ; <i>CloudCompare</i> ; <i>JDK</i> ; <i>PostgreSQL</i> ; Tomcat; Linux (Ubuntu); <i>Blender</i> ; <i>FME engine</i> ; <i>PostgreSQL + PostGIS</i> .
Elevação do nível do mar	Modelo em blocos; Modelo econômico foto realista; Modelo detalhado fotorealista; Modelo de textura genérica.	<i>Inet series</i> ; <i>ArcGIS</i> ; <i>GeoBeans3D</i> ; <i>TerraSuite</i> .
Gestão urbana / Uso da terra	Varredura a laser; fotogrametria; posicionamento diferencial via satélite.	<i>SketchUP</i> ; CAD; <i>ArcGIS GRASS GIS</i> .
Microclima urbano	Sensores de satélite.	Não mencionado.
Descarbonização	ENER – BI + <i>Cities4ZERO</i> .	<i>QGIS</i> ; <i>EnergyPlus</i> ; <i>EnergyPLAN</i> ; <i>Power BI</i> ; <i>InfluxDB</i> ; <i>PostgreSQL</i> ; <i>PostGIS</i> .
Enchente	<i>CityGML</i> Visualizações com <i>FZK viewer</i> e <i>Cesium</i>	<i>ArcGIS</i> ; <i>PostgreSQL</i> ; <i>PostGIS</i> ; <i>FME engine</i> .

<i>Watershed Modelling System.</i>
------------------------------------

Fonte: Elaborado pela autora baseado nos dados trazidos em Riaz, McAfee e Gharbia (2023).

A terceira categoria expõe sobre os GDs. As ferramentas mapeadas pelos autores são apresentadas de forma simplificada no Quadro 6. Neste caso é possível notar que há menos especificação dos *softwares*/ferramentas e mais de quais técnicas estão sendo utilizadas para esses temas.

Quadro 6- Ferramentas para Gêmeos Digitais em Riaz, McAfee e Gharbia (2023).

<b>Tema</b>	<b>Ferramentas Utilizadas</b>
Inundações	Simulação de <i>skyline</i> + simulação de inundação + simulação de multidões + simulação de marcação de usuários. Modo hidrodinâmico 3D + fotogrametria aérea digital + imagens oblíquas + sensoriamento social (abordagem baseada em grafos + algoritmo de ranqueamento de imagens + consciência situacional).
Zona úmida	Sensores IoT + dados de sensores sociais + <i>ThingWorx</i> + experiência do usuário em Realidade Aumentada ( <i>AR UX</i> ).
Gestão de cid. Inteligentes	<i>CityGML</i> + modelo 3D da cidade. <u>Ilha de calor</u> : Sensoriamento remoto + dados de imagens de satélite. <u>Emissão de carbono</u> : Dados brutos + dados 3D de edificações + valores de emissões de carbono estimados + <i>CityGML</i> + padrão <i>OGC SensorThings API</i> .
Gestão de cidades	Visualização de tráfego + mapas de calor + modelos 3D da cidade. Câmeras de vigilância + sensores de pressão + sensores de umidade + sensores de temperatura + sensores de poluição do ar + dados de geolocalização de veículos + informações dos cartões de transporte dos passageiros + modelo 3D da rede viária com sintaxe espacial + simulação de mobilidade urbana com <i>SUMO (Simulation of Urban Mobility)</i> + simulação de fluxo de ar + dados da rede de sensores (temperatura, umidade) + dados sociais. <u>Desastres</u> : Sensoriamento participativo + dados visuais provenientes de <i>crowdsourcing</i> . Sensoriamento remoto + radar de abertura sintética (SAR) + <i>LiDAR</i> + faixa óptica e térmica + sensoriamento social.
Gestão da paisagem urbana	<i>LiDAR</i> + modelagem de nuvem de pontos + modelos digitais 3D geo específicos (varredura a laser) + Modelo de <i>voxels</i> + dinâmica dos fluidos computacionais (CFD).
Moldagem climática extrema	FKB-Laser10 + mapas digitais de elevação + ferramenta <i>SIG</i> (Sistema de Informação Geográfica) para níveis de calamidade em sistemas de drenagem urbana.
Agricultura	<i>WebGIS</i> + imagens de satélite + dados obtidos por sensoriamento remoto.

Fonte: Baseado nos dados trazidos em Riaz, McAfee e Gharbia (2023).

Alguns dos trabalhos revisados durante esta pesquisa dão ênfase à parte de representação digital. Toledo *et al.* (2024) trazem a visão do Gêmeo Digital mais atrelada ao subtipo Modelo Digital, sem menção à coleta de dados com uso da IoT, se concentrando na produção de uma representação digital precisa. O uso de dados, a partir de levantamentos indiretos (via escaneamento a laser ou fotogrametria), são

expostos nesta fase de modelagem digital. Essa já é uma prática adotada na documentação de bens patrimoniais (Murphy; McGovern; Pavia).

Chen, Fan e Li (2023) concentram suas pesquisas no aprimoramento de nuvens de pontos, a fim de servirem para criação de representações digitais para GDs, utilizando algoritmos e métodos de aprendizado profundo (IA). A produção do modelo digital não é, necessariamente, uma etapa separada, isso pode ser observado na pesquisa de Pan e Zhang (2021), o modelo digital para o GD tem dados coletados por um drone com sensor *LiDAR* capaz de transferi-los diretamente para um servidor em nuvem (IoT).

Apesar de não trabalhar diretamente com o conceito de GD e IoT, Delgado *et al.* (2023) relatam informações para aquisição de nuvens de ponto com drones (do inglês UAV - *Unmanned Aerial Vehicle*), citando ferramentas e formato de arquivos para seu uso na produção de modelos BIM, o que pode ser útil para criar modelos digitais de GDs ou, como trazido pelos autores, para simulações energéticas. No caso das simulações, os autores mencionam o uso do *DesignBuilder (EnergyPlus)* e compararam os dados coletados dos sensores instalados em uma residência, com as simulações no *software* obtendo resultado satisfatório de correlação (Delgado *et al.*, 2023).

Nos estudos sobre GD, direcionados à eficiência energética e revisados por Bortolini *et al.* (2022), a ferramenta *Autodesk Revit* é a mais utilizada, e pode ser trabalhada em conjunto com *Green Building Studio*, *Insight* e *Dynamo* (Bortolini *et al.*, 2022). No caso de Agostinelli *et al.* (2021), que utilizam IA e IoT para otimizarem a gestão energética, além do *software MC4*, os autores realizam uma comparação nas mesmas condições com o *software Termus* BIM e o *ArchiEnergy*, e não consideram as variações muito significativas.

Chacón *et al.* (2024), durante uma das etapas de seus experimentos no canteiro de obras (gerenciamento de vazamento de concreto) na fase de rotulagem de dados, realizaram uma comparação entre algoritmos de AM (subárea da IA), e consideraram o algoritmo *Random Forest* como o de melhor desempenho em sua aplicação. Em relação a plataforma IoT *Mainflux* utilizada, os autores a consideram interessante por ser capaz de efetuar comunicação em diversos protocolos sendo “escalável, segura,

de código aberto e livre de patentes” (Mainflux, s.d. *apud* Chacón *et al.*, 2024, p.7, tradução nossa).

Em seu trabalho Steinmetz *et al.* (2022), exemplificam o uso de duas ferramentas para produção de GD, expondo um estudo de caso para um sistema de compartilhamento de veículos. O *Node-Red* tem uma interface de programação visual e foi utilizado no processo de conexão de dados, já o *software Carla* na criação do ambiente virtual que permitiu as simulações (Steinmetz *et al.*, 2022). Ambas as ferramentas são de código aberto <sup>11</sup>(do inglês *open sourcer*), descrita pelos autores como potenciais e flexíveis para serem aplicadas em GDs para outros contextos complexos.

Demais ferramentas das pesquisas encontram-se no Quadro 2 (página 52). Algumas foram relatadas pelos autores de forma positiva, porém, é necessário compreender que sua aplicação pode estar mais atrelada ao contexto local, como por exemplo, a *VWorld* usada por Lee *et al.* (2022) para adquirir modelos digitais, sendo específico para a Coreia. Informações sobre os tipos de licenciamento de *softwares*, citados anteriormente, são apresentadas a seguir no Quadro 7:

Quadro 7 - Licenciamento dos *softwares* utilizados nos estudos de caso ou mencionados.

<b>Softwares/Ferramentas</b>	<b>Licença</b>	<b>Empresa ou Desenvolvedores</b>
<i>Alternative Design Suggestion</i>	-	Desenvolvido pelos autores Kalantari <i>et al.</i> (2022).
<i>ANSYS Discovery Live</i>	Licença de uso comercial	<i>Ansys Inc.</i>
<i>Ansys Fluent</i>	Licença de uso comercial	<i>Ansys Inc.</i>
<i>Apache flink</i>	Licença de código aberto.	<i>Apache Software Foundation</i>
<i>Apache Kafka</i>	Licença de código aberto. Obs: Funcionalidades adicionais podem possuir outros tipos de licença.	<i>Apache Software Foundation</i>
<i>App Designer</i>	Licença de uso comercial	<i>MathWorks</i>
<i>ArcGIS</i>	Licença de uso comercial	<i>Esri</i>
<i>ArcMap</i>	Licença de uso comercial	<i>Esri</i>
<i>AutoCAD</i>	Licença de uso comercial.	<i>Autodesk.</i>
<i>Autodesk InfraWorks</i>	Licença de uso comercial.	<i>Autodesk.</i>
<i>Autodesk online viewer</i>	Licença de uso gratuita	<i>Autodesk.</i>
<i>Autodesk Revit Architecture</i>	Licença de uso comercial.	<i>Autodesk.</i>

<sup>11</sup> “O *software* de código aberto é um modelo de desenvolvimento de *software* descentralizado e colaborativo, que distribui o código-fonte publicamente. Isso permite que qualquer pessoa possa usar, examinar, alterar e redistribuir como quiser, geralmente sem custo” (IBM, s.d. c).

<i>Autodesk Tandem</i>	Licença de uso comercial/ Licença de uso Gratuita.	<i>Autodesk.</i>
<i>Azure Digital Twin</i>	Licença de uso comercial	<i>Microsoft</i>
<i>Azure Web App Service Azure Digital Twins;</i>	Licença de uso comercial	<i>Microsoft</i>
<i>Bentley</i>	Licença de uso comercial.	<i>Bentley Systems</i>
<i>Bentley Context Capture4 for 3D</i>	Licença de uso comercial.	<i>Bentley Systems</i>
<i>Bentley OpenCities Map</i>	Licença de uso comercial.	<i>Bentley Systems</i>
<i>Bentley OpenCities Planner</i>	Licença de uso comercial.	<i>Bentley Systems</i>
<i>BIM Cloud</i>	Licença de uso comercial.	<i>Graphisoft.</i>
<i>Bimsync Arena</i>	Licença de uso comercial/ Licença de uso Gratuita.	<i>Catenda Hub.</i>
<i>Bionova One Click LCA,</i>	Licença de uso comercial.	<i>Bionova</i>
<i>Blender</i>	Licença de código aberto.	<i>Blender Foundation</i>
<i>Blueprint nodes</i>	Vinculado a Unreal Engine	<i>Epic Games</i>
<i>Building Twin</i>	Licença de uso comercial.	<i>Siemens</i>
<i>CAFM software</i>	Licença de uso comercial.	<i>Infraspeak</i>
<i>Carla simulator</i>	Licença de código aberto.	<i>Computer Vision Center</i>
<i>Cesium</i>	Licença de uso comercial.	<i>Cesium GS</i>
<i>CityEngine</i>	Licença de uso comercial.	<i>Ersi</i>
<i>CityGML</i>	Licença padrão aberto	<i>Open Geospatial Consortium</i>
<i>CityJSON</i>	Licença padrão aberto	<i>Open Geospatial Consortium</i>
<i>Civil 3D</i>	Licença de uso comercial.	<i>Autodesk</i>
<i>CloudCompare</i>	Licença de código aberto	-
<i>Datasmith</i>	Plugin da Unreal Engine	<i>Epic Games</i>
<i>DesignBuilder (EnergyPlus)</i>	Licença de uso comercial.	<i>DesignBuilder Software</i>
<i>DiRoots ParaManager;</i>	Complemento para o Revit Licença de uso Gratuita	<i>DiRoots</i>
<i>DiRoots SheetLink</i>	Complemento para o Revit Licença de uso Gratuita	<i>DiRoots</i>
<i>Dublin Docklands</i>	-	-
<i>Dynamo</i>	Licença de código aberto	<i>Autodesk</i>
<i>EnergyPLAN</i>	Licença de uso Gratuita.	<i>Aalborg University</i>
<i>EnergyPlus</i>	Licença de código aberto	<i>Building Technologies Office do Dep. de Energia dos EUA</i>
<i>Firefly (Plugin)</i>	Licença de uso Gratuita.	<i>Firefly Experiments; Andy Payne e Jason Kelly Johnson.</i>
<i>FIWARE</i>	Licença de código aberto	<i>FIWARE Foundation</i>
<i>FME engine</i>	Licença de uso comercial.	<i>Safe Software</i>
<i>Forge (Autodesk Platform Services)</i>	Licença de uso comercial.	<i>Autodesk.</i>
<i>FZK viewer</i>	Licença de uso gratuita.	<i>Karlsruhe Institute of Technology</i>
<i>Google Sheets Script</i>	Licença de código aberto/ gratuita	<i>Google</i>
<i>Grafana</i>	Licença de código aberto	<i>Grafana Lab</i>
<i>Grandlund Manager's Digital Twin</i>	Licença de uso comercial.	<i>Grandlund Manager</i>
<i>GRASS GIS</i>	Licença de código aberto	<i>GRASS Development Team</i>
<i>Grasshopper</i>	Licença de uso Gratuita. Obs: incorporado ao Rhino (Licença de uso comercial).	<i>David Rutten na Robert McNeel &amp; Associates.</i>
<i>Green Building Studio</i>	Licença de uso comercial.	<i>Autodesk.</i>

<i>InfluxDB</i>	Licença de uso comercial	<i>InfluxData</i>
<i>JDK</i>	Licença de código aberto/ gratuita	<i>Oracle</i>
<i>jQuery</i>	Licença de uso aberto.	<i>JS Foundation</i>
<i>Karamba 3D</i>	Licença de uso comercial	<i>Karamba3D</i>
<i>Linux</i>	Licença de código aberto	<i>Linux Foundation</i>
<i>Mainflux</i>	Licença de código aberto.	<i>Mainflux Labs</i>
<i>MATLAB</i>	Licença de uso comercial	<i>MathWorks</i>
<i>Matterport</i>	Licença de uso gratuita (limitação) e comercial.	<i>Matterport</i>
<i>Microsoft Azure</i>	Licença de uso comercial	<i>Microsoft</i>
<i>Microsoft Excel</i>	Licença de uso comercial	<i>Microsoft</i>
<i>MongoDB</i>	Licença gratuita, comercial e de código aberto.	<i>MongoDB Inc.</i>
<i>NetLogo (Agent-Based Simulation - ABS).</i>	Licença de código aberto	<i>Northwestern</i>
<i>Node-RED</i>	Licença de código aberto	<i>IBM/OpenJS Foundation</i>
<i>Oasys MassMotion</i>	Licença de uso comercial.	<i>Oasys.</i>
<i>OGC IndoorGML</i>	Licença de padrão aberto	-
<i>OpenStreetMap</i>	Licença de uso aberto	<i>OpenStreetMap Foundation</i>
<i>Plataforma Blynk.io</i>	MIT código aberto	<i>Blynk Inc.</i>
<i>Plataforma Matterport</i>	Licença de uso comercial	<i>Matterport Inc.</i>
<i>PostGIS (extensão PostgreSQL)</i>	Licença de código aberto	
<i>PostgreSQL</i>	Licença de código aberto	<i>PostgreSQL Global Development Group</i>
<i>Power BI</i>	Licença comercial e gratuita	<i>Microsoft</i>
<i>Processing</i>	Licença de código aberto, gratuita.	Ben Fry e Casey Reas
<i>ProM</i>	Licença de código aberto	-
<i>PVGIS (Europa)</i>	Licença gratuita	<i>Joint Research Centre</i>
<i>QGIS</i>	Licença de código aberto	<i>QGIS Organization</i>
<i>RealEstateCore</i>	Licença de código aberto	<i>RealEstateCore Consortium</i>
<i>Rhino.Inside Revit</i>	Licença de uso Gratuita Obs: depende de <i>softwares</i> com licença de uso comercial para execução.	<i>Robert McNeel &amp; Associates.</i>
<i>Rhinoceros (Rhino)</i>	Licença de uso comercial.	<i>Robert McNeel &amp; Associates.</i>
<i>SheetGo</i>	Licença de uso comercial.	<i>SheetGo Europe SL</i>
<i>Sketchup</i>	Licença de uso comercial	<i>Trimble Inc.</i>
<i>SUMO - Simulation of Urban Mobility</i>	Licença de código aberto.	-
<i>Termus BIM</i>	Licença de uso comercial	<i>ACCA Software</i>
<i>TerraSuite</i>	Licença de uso comercial	<i>Skyline Software</i>
<i>ThingSpeak</i>	Licença de uso comercial/ Licença de uso Gratuita.	<i>MathWorks</i>
<i>ThingWorx</i>	Licença de uso comercial	<i>PTC</i>
<i>TICA (triangle-based IndoorGML construction authoring tool)</i>	Licença de código aberto.	(Disponibilizado pelos autores Lee et al. 2024)
<i>Tomcat</i>	Licença de código aberto	<i>Apache Software Foundation</i>
<i>Unity</i>	Licença de uso comercial/ Licença de uso Gratuita.	<i>Unity Technologies</i>
<i>Unreal Engine</i>	Licença de uso comercial/ Licença de uso Gratuita.	<i>Epic Games</i>

<i>VirtualcityMAP</i>	Acesso web	<i>Cesium</i>
<i>VisualARQ</i>	Licença de uso comercial	<i>Asuni Group</i>
<i>VWorld</i>	-	-
<i>Watershed Modelling System</i>	Licença de uso comercial/ Licença de uso Gratuita.	<i>Aquaveo</i>
<i>WebGL</i>	Licença de padrão aberto	<i>Khronos Group</i>
<i>X3DOM</i>	Código aberto	<i>Fraunhofer</i>

Fonte: Elaborado pela autora (2024 - 2025).

De modo geral, observa-se que há uma variação no uso de ferramentas e *softwares* de acordo com os estudos de caso (Nhamage, 2023). O *software Autodesk Revit* para trabalhar com a abordagem BIM, foi um dos *softwares* mais citados nos estudos direcionados a edificações. Por outro lado, nota-se a presença de ferramentas de desenvolvimento de jogos com foco nas áreas urbanas. Como mencionado anteriormente, o comportamento final desejado, interfere bastante nas escolhas das ferramentas porque as interações nos motores de jogo permitem o uso de objetos dinâmicos com visualizações em “tempo real” (Bolpagni *et al.*, 2023; Deng; Menassa; Kamat, 2023; Jiao *et al.* 2024).

A maior parte das ferramentas trazidas no Quadro 7, são comerciais. Em relação ao acesso, para trabalhos de pesquisadores com vínculo acadêmico/estudantil alguns destes *softwares* possuem preços de licenças reduzidos ou licenças temporárias gratuitas para fins de aprendizado como o conjunto de *softwares Autodesk*. Sobre *softwares* comerciais e de código aberto Nhamage (2023) descreve:

Algumas pesquisas sobre GDs não são muito claras, por exemplo, quanto ao *software* e aos processos de comunicação entre as entidades físicas e digitais, principalmente do ponto de vista da implementação prática. Em relação ao *software*, existem os chamados “*softwares* de código fechado (CSS)”, geralmente comerciais e predeterminados para executar tarefas específicas, e por isso seu uso em GDs (ou modelos semelhantes) geralmente se limita à combinações com outros *softwares* ou aplicativos para o propósito desejado, sendo que as incompatibilidades entre os *softwares*/aplicativos podem representar limitações possíveis. Por outro lado, “os *softwares* de código aberto (OSS)” são abertos a uma variedade de aplicações e modificações; no entanto, dependendo do objetivo, seu uso pode ser excessivamente complexo (Nhamage 2023, p. 13, tradução nossa).

Logo, assim como observado por Fialho *et al.* (2022) ao falar sobre a vantagem do uso da ferramenta comercial, descreve benefícios ao adotar o *Revit*, mas que o valor das licenças acaba elevando o custo do projeto, portanto os *softwares* de código aberto são uma solução para contornar esse custo. Algumas soluções, nesta área, são desenvolvidas com ênfases específicas, como o *software TICA* para edição de

geometria 3D, que é uma ferramenta produzida e disponibilizada pelos autores Lee *et al.* (2024).

## 4.2 O Experimento

Os resultados apresentados a seguir foram obtidos a partir do processo descrito na seção 3 - Procedimentos Metodológicos, item 3.3 em diante. De modo sucinto, o experimento envolveu o desenvolvimento de dispositivos de monitoramento e protótipos de brises que foram locados em ambientes de estudo de caso.

### 4.2.1 Produção dos Brises

Após a produção das peças com a tecnologia de manufatura aditiva, as mesmas foram montadas. A versão inicial do brise desenvolvida com o termoplástico biodegradável *Ácido Polilático (PLA)* precisou ser otimizada em termos de dimensão e massa. Com a segunda versão do modelo digital definida, ele foi produzido novamente em PLA. Testes foram realizados para verificar a possibilidade de manter o movimento no eixo central ao colocar a estrutura na posição vertical; entretanto, isso aumentava o peso do objeto. Como solução, além de reduzir o peso do sistema, optou-se por manter o micro servo motor acima da janela para realizar o movimento (Figura 14), garantindo a estabilidade e funcionalidade do projeto.

Figura 14 – Brise vinculado ao micro servo motor.



Fonte: Autora (2025).

Durante o desenvolvimento do protótipo físico, a peça de transmissão ligada ao motor, responsável por acionar o eixo principal e coordenar o movimento das partes do brise, foi fabricada em PLA e MDF (Figura 15). No entanto, durante o manuseio para o encaixe no laboratório, as peças apresentaram quebras constantes. Para manter a leveza da peça, uma cópia dela foi impressa com filamento APEX Carbono, o que permitiu manter a espessura de 3mm e garantir maior resistência.

Figura 15 – A esquerda peças produzidas em MDF e PLA, a direita em APEX Carbono.



Fonte: Autora (2025).

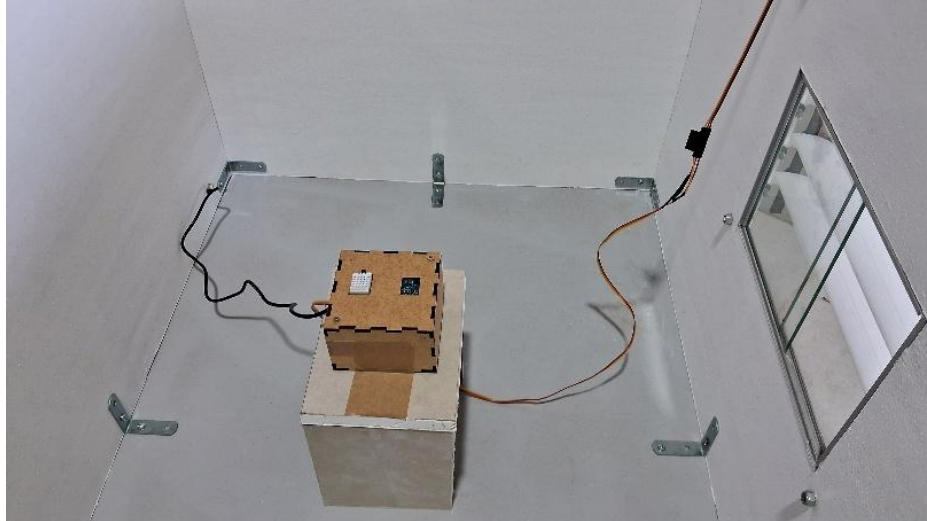
Após as análises de movimentação no laboratório, essas versões foram testadas já com os dispositivos de monitoramento nos ambientes de estudo do caso 2 e 3. Ao expor o ambiente de estudo do caso 2 à iluminação solar na fachada norte pela primeira vez entre as 15:05h e às 17:35h, o material cinza apresentou deformação. Nesse cenário, a cor cinza absorveu maior quantidade de radiação solar do que a branca, resultando em aquecimento e alteração na forma original do objeto devido às propriedades do material PLA não apresentarem resistência a altas temperaturas. A versão final das peças foi impressa usando o termoplástico *Acrilonitrila Butadieno Estireno* (ABS) na cor branca, que possui maior resistência ao calor (Lesko, 2012).

#### 4.2.2 Monitoramento

Nesta subseção, são expostos os resultados obtidos da coleta de dados dos dispositivos de monitoramento. Como descrito anteriormente, cada dispositivo foi locado em um ambiente de estudo de caso, na mesma posição sobre um suporte que simula a altura de um plano de trabalho com as mesmas características e dimensões

(Figura 16). Os dispositivos dos ambientes de estudo de caso 1 e 2 estavam programados para enviar dados ao *ThingSpeak* a cada 30 minutos. Já o ambiente de estudo caso 3 a cada 20 minutos.

Figura 16 – Dispositivo número 3 colocado sobre um suporte.



Fonte: Autora (2025).

Os ambientes de estudo de caso foram posicionados ao sol em uma cobertura de telha cerâmica (Figura 17) com as esquadrias direcionadas à fachada norte durante 20 dias consecutivos, entre o mês de abril e maio de 2025, no município de Goiânia (GO). Esse período teve uma variação de dias nublados, ensolarados e com precipitações. A Figura 18 expõe quais dados foram coletados em cada ambiente de estudo de caso. A seguir, são detalhadas as principais informações relacionadas a cada dispositivo:

Figura 17 – Posição dos ambientes de estudo de caso sobre a cobertura de telha cerâmica.



Fonte: Google Maps, imagem modificada pela autora (2025).

Figura 18 – Indicação da posição e dos dados coletados em cada dispositivo.



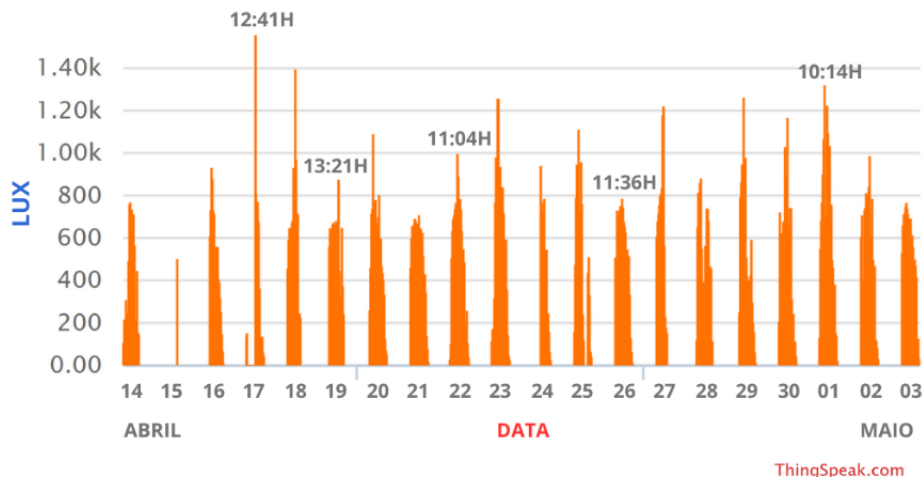
Fonte: Autora (2025).

#### a) Dispositivo do ambiente de estudo do caso 1

O primeiro dispositivo foi instalado no ambiente de estudo do caso 1, que não possui um sistema de Brise. Nesse período, os valores mais elevados coletados pelo sensor de luminosidade foram capturados entre as 10:00h e as 13:40h. O dia 18 de abril, por exemplo, esteve ensolarado até por volta das 14h, e começou a ter precipitações às 14:20h. Nesse caso, o sensor chegou a marcar 929,99 Lux às 10h:59m:58s, e 1393,33 Lux às 12:00h.

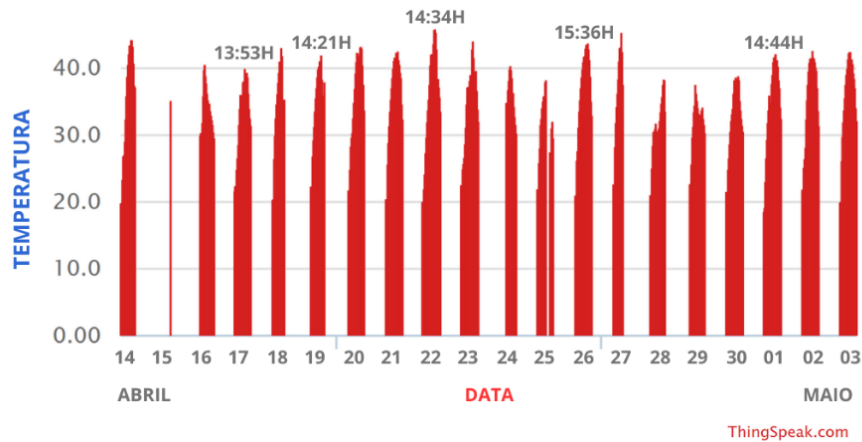
As Figuras 19, 20 e 21 demonstram os gráficos em colunas com a distribuição da coleta dos dados aos longos dos 20 dias, destacando as diferenças nos valores coletados diariamente. Quadro 8 expõe detalhes sobre as condições de tempo e funcionamento do dispositivo:

Figura 19 –Dados coletados de sensor de luminosidade no ambiente de estudo do caso 1.



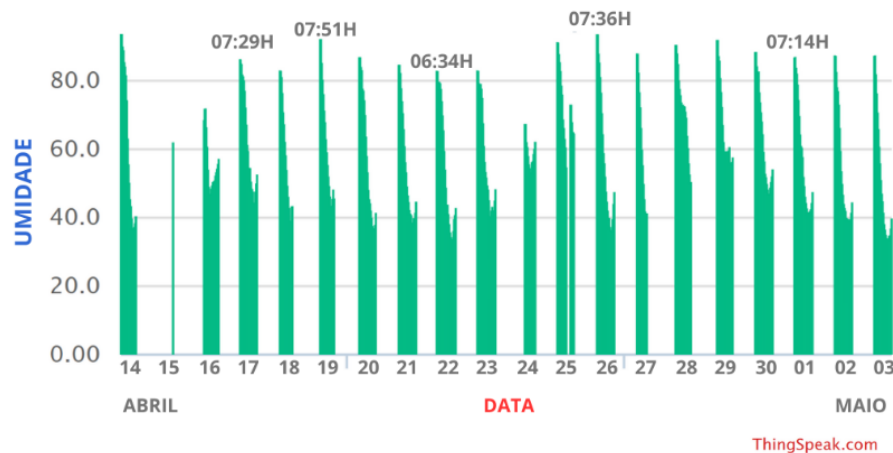
Fonte: Adaptado da plataforma ThingSpeak.

Figura 20 - Dados coletados pelo sensor de temperatura no ambiente de estudo do caso 1.



Fonte: Adaptado da plataforma ThingSpeak.

Figura 21 - Dados coletados pelo sensor de umidade no ambiente de estudo do caso 1.



Fonte: Adaptado da plataforma *ThingSpeak*.

Quadro 8 - Status da coleta e transmissão de dados no ambiente de estudo do caso 1.

AMBIENTE DO ESTUDO DE CASO 1			
<b>Data</b>	<b>Condição do Tempo</b>	<b>Percepção</b>	<b>Rede</b>
14/04	Parcialmente ensolarado, Precipitação.	Funcionamento conforme esperado.	Funcionamento conforme esperado.
15/04	Parcialmente ensolarado, precipitações.	A quantidade de dados coletados foi insuficiente para determinar o funcionamento adequado do sistema.	A quantidade de dados coletados foi insuficiente para determinar o funcionamento adequado do sistema.
	Houve precipitação em boa parte do dia e o sistema teve que ser desligado durante este período.		

16/04	Manhã ensolarada, tarde maior parte nublada.	Falha na aquisição de dados no início da manhã, exigindo a substituição da fonte de alimentação do dispositivo. A coleta no restante do dia foi como esperada.	Funcionamento conforme esperado.
17/04	Parcialmente nublado.	Funcionamento conforme esperado.	Funcionamento conforme esperado.
18/04	Manhã ensolarada, com precipitações temporárias no período da tarde.	Funcionamento conforme esperado. Foi necessário desligar o sistema durante a chuva.	Funcionamento conforme esperado. Foi necessário desligar o sistema durante a chuva.
19/04	Manhã ensolarada, com precipitações temporárias no período da tarde.	Funcionamento conforme esperado.	Funcionamento conforme esperado.
20/04	Ensolarado com nuvens.	Funcionamento conforme esperado.	Funcionamento conforme esperado.
21/04	Ensolarado.	Funcionamento conforme esperado.	Funcionamento conforme esperado.
22/04	Ensolarado	Funcionamento conforme esperado.	Funcionamento conforme esperado.
23/04	Nublado e ensolarado.	Funcionamento conforme esperado.	Funcionamento conforme esperado.
24/04	Início do dia com precipitação. Céu Nublado.  Foi necessário aguardar o término da precipitação pela manhã e um período adicional devido à umidade residual na fachada principal. Entre 15:00 e 16:00, houve interrupção momentânea de energia por parte da concessionária.	Funcionamento conforme esperado.	Funcionamento conforme esperado.
25/04	Céu Nublado, precipitação Entre 13:00 e 15:30, houve precipitação, portanto o sistema teve de ser desligado. Após ser reiniciado houve interrupção momentânea de energia pela concessionária, mas não afetou o período da coleta.	Maior parte operando conforme esperado.	Funcionamento conforme esperado.
26/04	Ensolarado.	Funcionamento conforme esperado.	Funcionamento conforme esperado.
27/04	Ensolarado, precipitação.  Houve precipitação a partir das 14h e o sistema teve que ser desligado.	Funcionamento conforme esperado.	Funcionamento conforme esperado.
28/04	Nublado, parcialmente ensolarado, precipitação.  Houve precipitação a partir das 16:30h e o sistema teve que ser desligado.	Funcionamento conforme esperado.	Funcionamento conforme esperado.

29/04	Nublado.	Funcionamento conforme esperado.	Funcionamento conforme esperado.
30/04	Ensolarado com nuvens.	Funcionamento conforme esperado.	Funcionamento conforme esperado.
01/05	Ensolarado com nuvens.	Funcionamento conforme esperado.	Funcionamento conforme esperado.
02/05	Predominantemente ensolarado.	Funcionamento conforme esperado.	Funcionamento conforme esperado.
03/05	Ensolarado	Funcionamento conforme esperado.	Funcionamento conforme esperado.

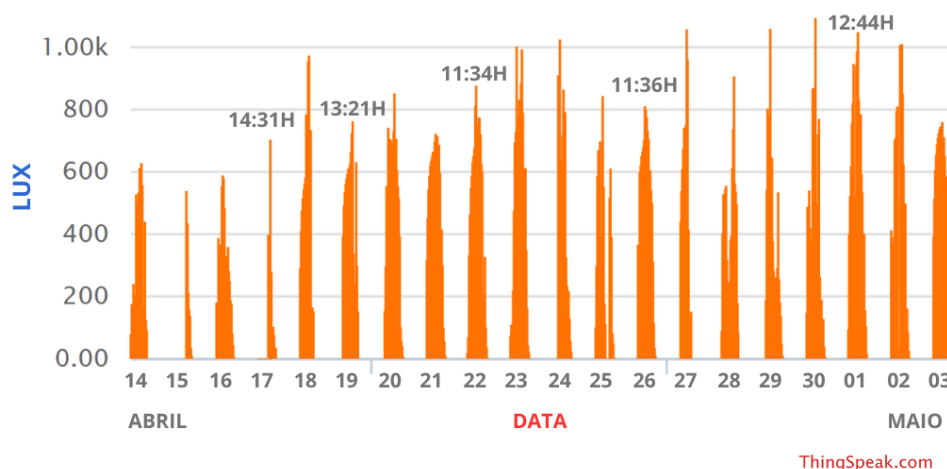
Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Ao observar o Quadro 8, os dados revelam que a coleta realizada pelo sistema de monitoramento funcionou conforme o esperado na maioria dos dias, em especial sob condições de tempo seco, como dias ensolarados ou nublados sem chuva, onde não houve registro de problemas. No entanto, ocorreram precipitações que impactaram no funcionamento dos dispositivos, tais como a necessidade de desligamento preventivo, falhas técnicas e coleta insuficiente de dados.

#### b) Dispositivo do ambiente de estudo do caso 2

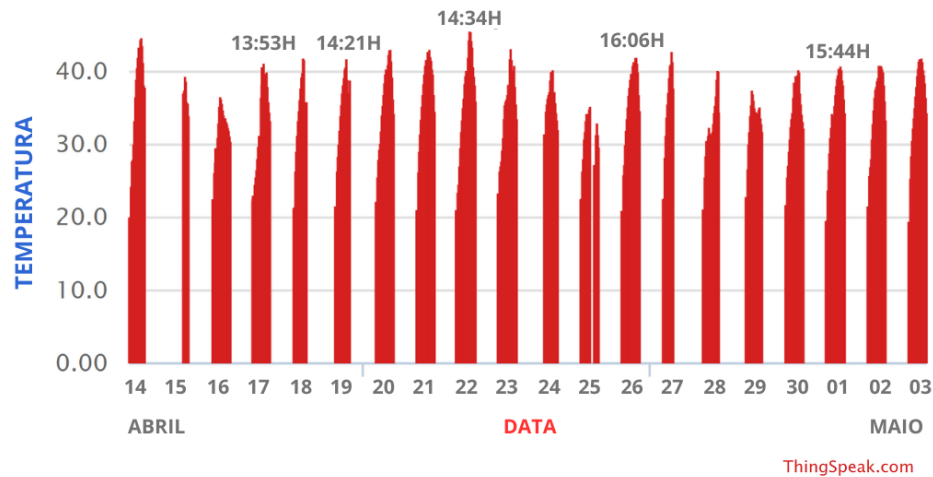
O segundo dispositivo foi instalado em um ambiente com sistema de Brise Fixo com as aletas posicionadas a 90° (ambiente de estudo do caso 2). As Figura 22, 23 e 24 demonstram os gráficos em colunas com a distribuição da coleta dos dados de iluminação, temperatura e umidade, e o Quadro 9 traz informações sobre as condições de tempo e funcionamento do dispositivo.

Figura 22 – Dados coletados pelo sensor de luminosidade no ambiente de estudo do caso 2.



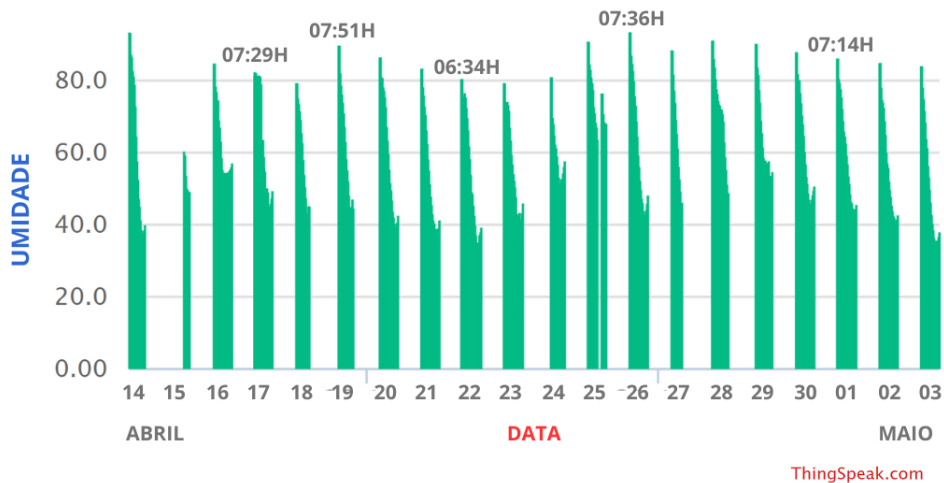
Fonte: Adaptado da plataforma *ThingSpeak*.

Figura 23 – Dados coletados pelo sensor de temperatura no ambiente de estudo do caso 2.



Fonte: Adaptado da plataforma *ThingSpeak*.

Figura 24 –Dados coletados pelo sensor de umidade no ambiente de estudo do caso 2.



Fonte: Adaptado da plataforma *ThingSpeak*.

Quadro 9 - Status da coleta e transmissão de dados do ambiente de estudo do caso 2.

AMBIENTE DO ESTUDO DE CASO 2			
<b>Data</b>	<b>Condição do Tempo</b>	<b>Percepção</b>	<b>Rede</b>
14/04	Parcialmente ensolarado, Precipitação.	Funcionamento conforme esperado.	Funcionamento conforme esperado.
15/04	Parcialmente ensolarado, precipitação. Houve precipitação pela manhã e o sistema teve que ser ligado apenas à tarde.	Funcionamento conforme esperado (tarde).	Funcionamento conforme esperado (tarde).
16/04	Manhã ensolarada, tarde maior parte nublada.	Funcionamento conforme esperado.	Funcionamento conforme esperado.
17/04	Parcialmente nublado. O dispositivo saiu do suporte e precisou de ajuste.	Coleta de temperatura e umidade normal. Iluminação negativa, devido à queda do dispositivo do suporte.	Funcionamento conforme esperado.

18/04	Manhã ensolarada, com precipitações temporárias no período da tarde. Houve precipitação e o sistema teve que ser desligado durante este período.	Funcionamento conforme esperado.	Funcionamento conforme esperado.
19/04	Manhã ensolarada, com precipitações temporárias no período da tarde.	Funcionamento conforme esperado.	Funcionamento conforme esperado.
20/04	Ensolarado com nuvens.	Funcionamento conforme esperado.	Funcionamento conforme esperado.
21/04	Ensolarado.	Funcionamento conforme esperado.	Funcionamento conforme esperado.
22/04	Ensolarado	Funcionamento conforme esperado.	Funcionamento conforme esperado.
23/04	Nublado e ensolarado.	Funcionamento conforme esperado. Houve ausência da coleta de apenas um dado de iluminação entre as 10:06h e às 11:06h (causa desconhecida).	Funcionamento conforme esperado.
24/04	Início do dia com precipitação. Houve precipitação pela manhã e o sistema teve que ser desligado.	Maior parte operando conforme esperado. O sistema foi ativado após o término da precipitação. Entre 10:44h e 11:44h, houve falha na coleta de um dado de iluminação. A concessionária de energia interrompeu o fornecimento por alguns minutos entre 15:00h e 16:00h.	Funcionamento conforme esperado.
25/04	Céu nublado, precipitação. Houve precipitação entre 13:00h – 15:00h e o sistema teve que ser desligado durante este período. Após ser reiniciado houve interrupção momentânea de energia pela concessionária.	Maior parte operando conforme esperado.	-
26/04	Maior parte ensolarado.	Funcionamento conforme esperado.	Funcionamento conforme esperado.
27/04	Ensolarado, precipitação. Houve precipitação a partir das 14h e o sistema teve que ser desligado.	Funcionamento conforme esperado.	Funcionamento conforme esperado.
28/04	Nublado, parcialmente ensolarado, precipitação. Houve precipitação a partir das 16:30h e o sistema teve que ser desligado.	Funcionamento conforme esperado.	Funcionamento conforme esperado.
29/04	Nublado.	Funcionamento conforme esperado.	Funcionamento conforme esperado.
30/04	Ensolarado com nuvens.	Funcionamento conforme esperado.	Funcionamento conforme esperado.
01/05	Ensolarado com nuvens.	Funcionamento conforme esperado.	Funcionamento conforme esperado.

02/05	Predominantemente ensolarado.	Funcionamento conforme esperado.	Funcionamento conforme esperado.
	Entre 11:40 -12:10 (os valores ficaram baixos em decorrência de fatores externos)		
03/05	Ensolarado	Funcionamento conforme esperado.	Funcionamento conforme esperado.

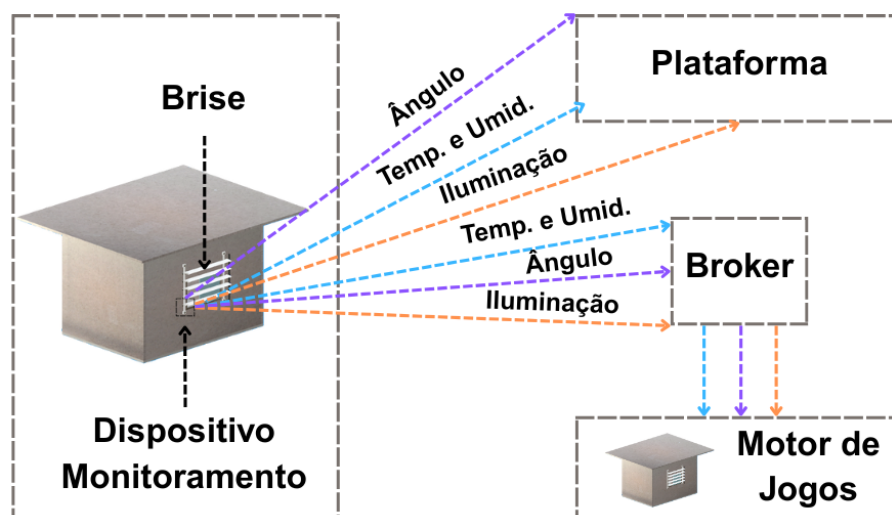
Fonte: Elaborado pela autora (2025).

De semelhante modo no Quadro 9, foi possível observar que o sistema (Dispositivo 2) funcionou conforme o esperado. Com as mesmas ocorrências de precipitações, adotando o mesmo procedimento de desligamento preventivo. O dispositivo saiu do suporte no dia 17/04 e precisou de ajuste. Ocorreram duas falhas pontuais na coleta de um dado do sensor de iluminação por uma hora nos dias 23/04 e 24/04, a causa não foi identificada.

### c) Dispositivo do ambiente do estudo de caso 3

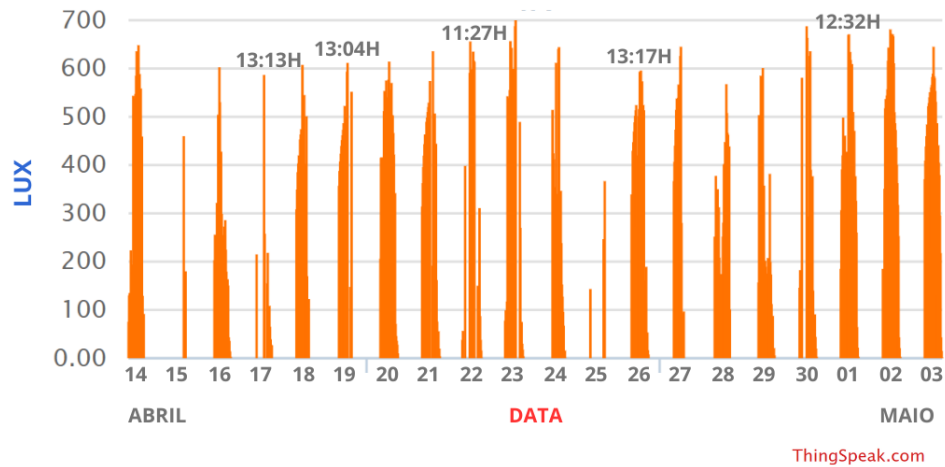
O dispositivo do ambiente de estudo do caso 3 está associado ao Brise, cujo objetivo é manter a iluminação interna entre 300 e 700 Lux se ajustando automaticamente e transferindo os dados (via MQTT) de iluminação, temperatura, umidade e do ângulo que foi utilizado durante o ajuste para o modelo digital replicar o movimento em “tempo real”. O envio de dados para a plataforma do *ThingSpeak* ocorreu a cada 20 minutos (Figura 26, 27 e 28). A Figura 25 exemplifica o direcionamento dos dados. O Quadro 10 expõe detalhes sobre as condições de tempo e funcionamento do dispositivo.

Figura 25 – Fluxo de dados dos sensores e atuador no ambiente de estudo do caso 3.



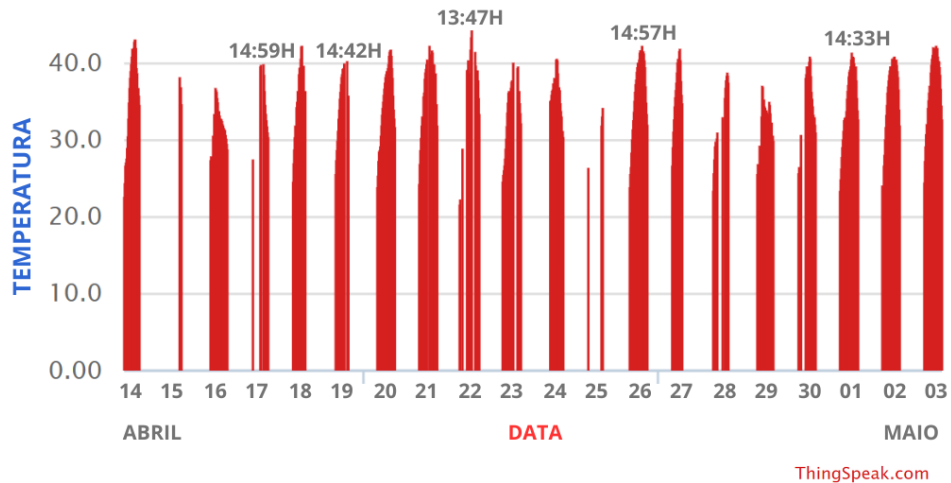
Fonte: Autora (2025).

Figura 26 - Dados coletados pelo sensor de luminosidade no ambiente de estudo do caso 3.



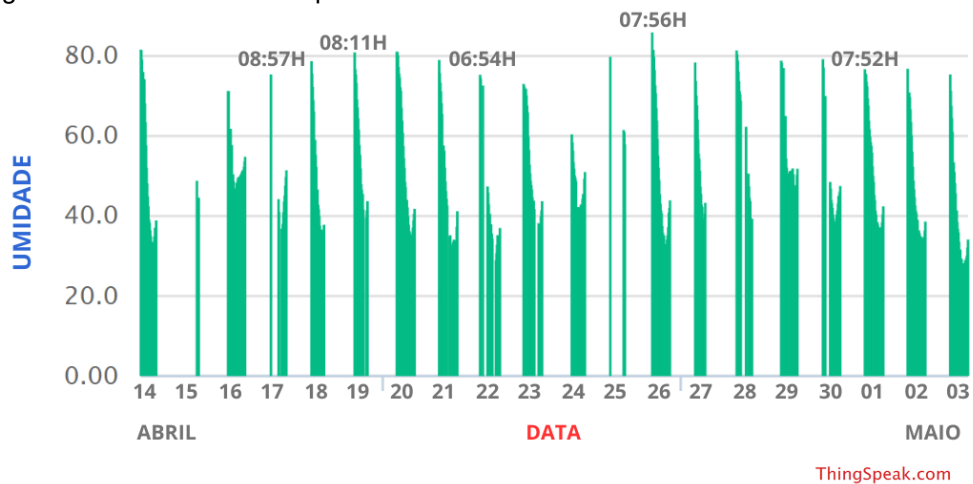
Fonte: Adaptado da plataforma *ThingSpeak*.

Figura 27 - Dados coletados pelo sensor de temperatura no ambiente de estudo do caso 3.



Fonte: Adaptado da plataforma *ThingSpeak*.

Figura 28- Dados coletados pelo sensor de umidade no ambiente de estudo do caso 3.



Fonte: Adaptado da plataforma *ThingSpeak*.

Quadro 10 - Status da Coleta e Transmissão de Dados no ambiente do estudo de caso 3.

<b>AMBIENTE DO ESTUDO DE CASO 3</b>				
<b>Data</b>	<b>Condição do Tempo</b>	<b>Percepção</b>	<b>Rede</b>	<b>Modelo Digital</b>
14/04	Parcialmente ensolarado, Precipitação.	Funcionamento conforme esperado.	Funcionamento conforme esperado.	Funcionamento conforme esperado.
15/04	Parcialmente ensolarado, Precipitações.	Funcionamento conforme esperado (tarde).	Funcionamento conforme esperado (tarde).	Funcionamento conforme esperado (tarde).
	Chuva pela manhã, o sistema foi inicializado no período da tarde.			
16/04	Manhã ensolarada, tarde maior parte nublada.	Funcionamento conforme esperado.	Funcionamento conforme esperado.	Funcionamento conforme esperado.
17/04	Parcialmente nublado.	Falha na aquisição de dados, devido a necessidade de ajuste na fonte geral de alimentação.	-	-
18/04	Manhã ensolarada, com precipitações temporárias no período da tarde.	Funcionamento conforme esperado.	Funcionamento conforme esperado.	Funcionamento conforme esperado.
	Foi necessário desligar o sistema durante a chuva.			
19/04	Manhã ensolarada, com precipitações temporárias no período da tarde.	Funcionamento conforme esperado.	Funcionamento conforme esperado	Funcionamento conforme esperado.
	Indicativo de precipitação foi realizado um desligamento temporário.			
20/04	Ensolarado com nuvens.	Funcionamento conforme esperado.	Funcionamento conforme esperado.	Funcionamento conforme esperado.
21/04	Ensolarado.	Funcionamento conforme esperado.	Falhas temporárias na transmissão de dados devido à instabilidade na rede Wi-Fi.	Falhas temporárias no recebimento de dados devido à instabilidade na rede Wi-Fi.
22/04	Ensolarado.	Funcionamento conforme esperado.	Falhas temporárias na transmissão de dados devido à instabilidade na rede Wi-Fi.	Falhas temporárias no recebimento de dados devido à instabilidade na rede Wi-Fi.
23/04	Manhã nublada e ensolarada. Tarde ensolarada com nuvens.	Funcionamento conforme esperado.	Funcionamento conforme esperado pela manhã. Falhas temporárias na transmissão de dados no período da tarde (entre 13:27h e 15:51h) devido à instabilidade na rede Wi-Fi.	Falhas temporárias no recebimento de dados devido à instabilidade na rede Wi-Fi.
24/04	Início do dia com precipitação.	Funcionamento conforme esperado. Foi necessário aguardar o fim do período de precipitação para ligar o sistema.	Falhas temporárias no recebimento de um dado devido à instabilidade na rede Wi-Fi.	Funcionamento conforme esperado.
25/04	Céu nublado, precipitação.	Funcionamento parcialmente adequado.	Falhas, na maior parte, no recebimento de dados devido à conexão com a rede Wi-Fi.	Falhas, na maior parte, no recebimento de dados devido à conexão com a rede Wi-Fi.
26/04	Maior parte ensolarado.	Funcionamento conforme esperado.	Falhas temporárias no recebimento de um dado devido à	Funcionamento conforme esperado.

			instabilidade na rede Wi-Fi.	
27/04	Ensolarado, precipitação. Precipitação: 14h.	Funcionamento conforme esperado.	Funcionamento conforme esperado.	Funcionamento conforme esperado.
28/04	Nublado, parcialmente ensolarado, precipitação.  Precipitações iniciaram às 16:13h, causando desligamento momentâneo. Após religar, novas precipitações levaram a novo desligamento.	O sensor de iluminação funcionou como esperado. A coleta de temperatura e umidade foi brevemente interrompida (causa desconhecida), mas retomada.	-	-
29/04	Nublado.	Funcionamento conforme esperado.	Funcionamento conforme esperado.	Funcionamento conforme esperado.
30/04	Ensolarado com nuvens.	Funcionamento maior parte como esperado.	Ausência de alguns dados na plataforma. Causa provável: Comunicação com a rede Wi-Fi.	Funcionamento conforme esperado.
01/05	Ensolarado com nuvens.	Funcionamento conforme esperado.	Funcionamento conforme esperado.	Funcionamento conforme esperado.
02/05	Predominantemente ensolarado.	Funcionamento conforme esperado.	Maior parte como esperado. Falha de conexão no início do dia (perca 2 dados).	Maior parte como esperado. Falha no recebimento inicial (camada de rede).
03/05	Ensolarado.	Funcionamento conforme esperado.	Maior parte como esperado. Falha de conexão (perca 2 dados).	Funcionamento conforme esperado.

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Assim como os dispositivos 1 e 2, a percepção geral de funcionamento do dispositivo 3 foi como esperada, porém, com intercorrências de conexão com a internet. No dia 22 de abril de 2025 houve instabilidade da rede Wi-Fi, o que ocasionou falhas no recebimento de dados do *ThingSpeak* e do *Broker*. É relevante ressaltar que o sinal que chegava ao *Broker* era predominantemente fraco. Outro fator a ser considerado é em relação à distância do receptor de sinal, pois o *Broker* estava localizado a aproximadamente 6 metros de distância e o ambiente do estudo de caso 3 a mais de 10 metros do receptor Wi-Fi, portanto, nestes casos, os dados também não eram recebidos pelo modelo digital de forma eficiente. Uma observação é que não houve falha na coleta de dados dos dispositivos 1 e 2 que se encontram um pouco mais próximos do receptor Wi-Fi e não enviam dados ao *Broker*.

Em suma, no dia 18 de abril de 2025, o ambiente do estudo de caso 2 com Brise fixo registrou dados de iluminação interna superiores a 700 Lux pela primeira vez (com um pico de 784,2 Lux às 11h), enquanto o ambiente do estudo de caso 1

atingiu 928,99 Lux no mesmo horário. Por outro lado, o ambiente do estudo de caso 3 teve seu Brise ajustado em diferentes ângulos, mantendo-se em torno de 500 Lux.

Um dos principais desafios foi relacionado à época do ano em que as coletas foram feitas, em abril de 2025. Os dias foram predominantemente ensolarados e nublados, com chuvas, o que dificultou a coleta contínua, precisando ser interrompida (desligamento) quando iniciavam as precipitações. No mês anterior, chegou-se a colocar os ambientes de estudo de caso na cobertura e realizar algumas poucas coletas. Entretanto, as precipitações sequenciais não contribuíram para manter o sistema ativo.

O Quadro 11 apresenta os valores de temperatura e iluminação máxima ao longo do período de coleta. Dados correspondentes ao momento de troca da fonte da alimentação ou outras intercorrências de ajustes descritos nos Quadros 8, 9 e 10 foram descartados.

Quadro 11 – Valores máximos de temperatura e iluminação coletados.

Ambiente do estudo de caso	Temperatura máxima	Iluminação máxima durante a coleta
1 (Sem Brise)	45.8 °C 14:34h - 22/04	1555.83 Lux 12:41h- 17/04
2 (Brise fixo)	45.5 °C 14:34h - 22/04	1094.16 Lux 12:31h - 30/04
3 (Brise Automático)	44.3 °C 13:47h - 22/04	700 Lux 13:27h - 23/04

Fonte: Autora (2025).

É possível observar nas figuras 20, 23 e 27 (temperatura) assim como no quadro 11 que a temperatura permaneceu constante tendo pouca variação entre o Brise estático e dinâmico, pois não houve incidência de radiação solar direta. Por se tratar da fachada norte, o brise horizontal estático já conseguiu evitar a entrada direta de radiação solar.

No caso do brise dinâmico, ele bloqueou a entrada de luz e conseqüentemente da radiação, mantendo-se dentro dos parâmetros pré-determinados (manter a iluminação interna entre 300 e 700 Lux). Portanto, ele ajustava as aletas automaticamente quando os dados se aproximavam dos valores definidos. Durante a coleta, nenhum dado registrado no Brise dinâmico ultrapassou 700 Lux. Ele chegou a registrar 700.00 em valor exato sem variação decimal.

### 4.2.3 Gêmeo Digital

Neste ponto apresenta-se o protótipo no ambiente digital. Uma cena padrão (3D) foi criada a partir do *Unity Hub*. O modelo digital produzido no *Blender* foi exportado em *.FBX* e inserido na pasta *Assets*. Essa pasta é importante, pois nela são armazenados todos os arquivos essenciais para o desenvolvimento do projeto, como o modelo digital, texturas, bibliotecas, componentes *scripts*, entre outros. Optou-se por fazer a texturização dentro da *Unity* em que também é possível criar materiais e definir propriedades como transparência, opacidade etc (Figura 29).

Figura 29 – Modelo digital na *Unity* texturizado.

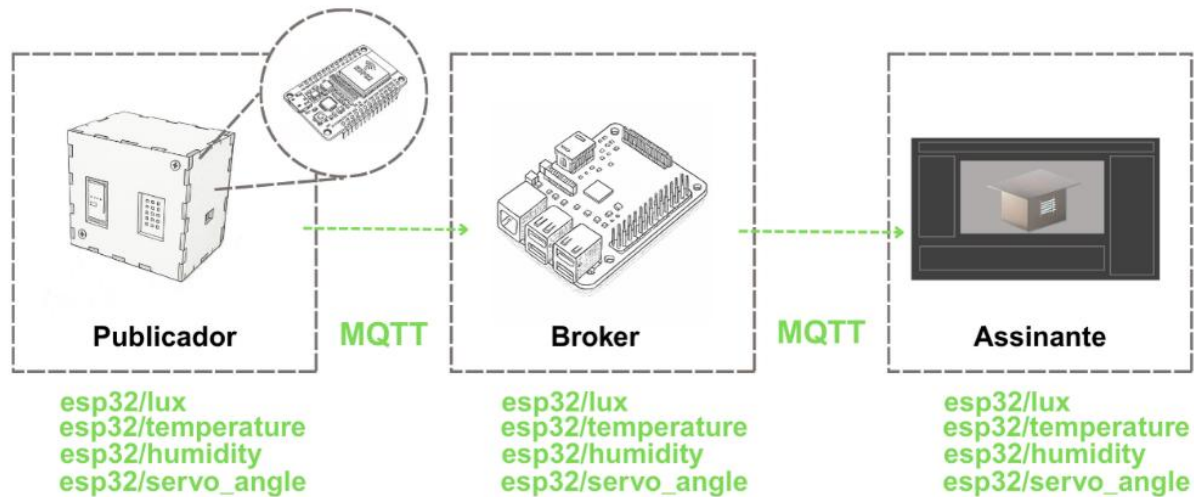


Fonte: Elaborado pela autora no *software Unity* (2025).

De acordo com Chen e Chiang (2015), o M2M (*Machine to Machine*), possui uma função muito importante para a IoT, pois essa técnica possibilita a comunicação entre dispositivos de forma automática. A biblioteca que permitiu o recebimento de dados do microcontrolador no motor de jogos, via protocolo MQTT, foi a *M2MqttUnity*, que é capaz de se conectar com diferentes *brokers*. Um objeto de jogo vazio (*Game Object Empty*) foi criado e lhe foi atribuído o componente *scripts* (C#) *mqttReceive*. No componente *script mqttReceive* são feitas as configurações do *Broker* indicando o endereço IP do dispositivo, a porta de recebimento dos dados, o nome do tópico que

recebe e envia as mensagens, entre outros (Connected Environments, s.d.). A dinâmica de transferência das informações é ilustrada na Figura 30:

Figura 30 – Fluxo de dados e tópicos das mensagens enviadas via protocolo MQTT.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Nota-se que o fluxo de informações é unidirecional do microcontrolador como publicador até a *Unity* como assinante do tópico. Nesse caso, não se observou a necessidade de enviar algum dado retornando ao microcontrolador, mas, com essa conformação, é possível realizar o processo inverso a *Unity* como publicador e o microcontrolador como assinante, realizando uma troca de dados bidirecionais.

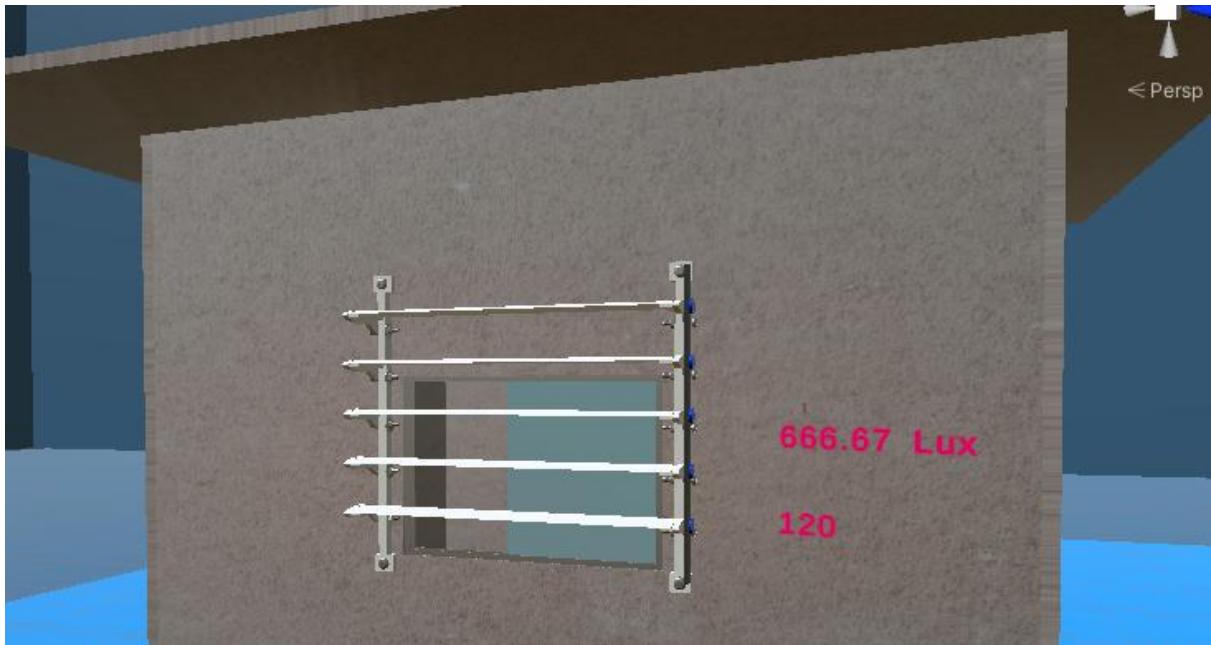
Visando exibir as informações no modelo digital, quatro componentes do tipo *Text Mesh Pro* (TMP) foram posicionados no ambiente do estudo de caso digital, sendo dois na parte interna e dois na fachada principal. A cada um desses foi associado o componente *script* (C#) *mqttController*, cujo objetivo é exibir os valores recebidos em “tempo real” nos componentes *Text Mesh Pro*<sup>12</sup> (Connected Environments, s.d.).

Após verificar a comunicação MQTT na Unity, por meio dos componentes *Text Mesh Pro* (Figura 31), iniciou-se com testes para controlar o movimento usando componentes de física. No entanto, o comportamento não foi o esperado. Uma das dificuldades envolvia a interação com as malhas de colisão em alguns objetos 3D, que

<sup>12</sup> Essa etapa de configuração da biblioteca *M2MqttUnity* (*mqttReceive* e *mqttController*) pode ser encontrada no site: <https://workshops.cetools.org/codelabs/CASA0019-unity-mqtt/#0>.

apesar das alterações nas configurações de detecções, não ocorria adequadamente, dificultando o controle dos movimentos.

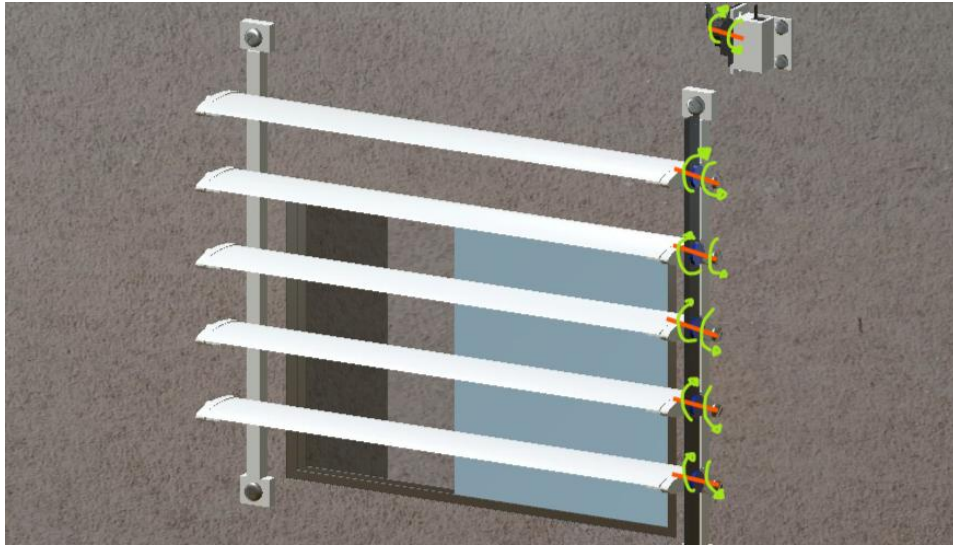
Figura 31 – Verificação do recebimento de dados (Iluminação e ângulo).



Fonte: Elaborado pela autora no *software Unity* (2025).

Com isso, adotou-se outra abordagem, controlar os movimentos das aletas a partir de pivôs localizados nos eixos de rotação que recebem os dados síncronos referentes ao ângulo do mini servo motor (Figura 32). Diversos objetos de jogos foram criados em estrutura de hierarquia. Os primeiros (Objeto pai) são nomeados como pivôs, cuja função é manter uma posição fixa, os demais são objetos cilíndricos (Objeto filhos) com seus colisores ativos usados no eixo de rotação das peças. Nessa conformação, os objetos filhos herdam as propriedades dos objetos pai.

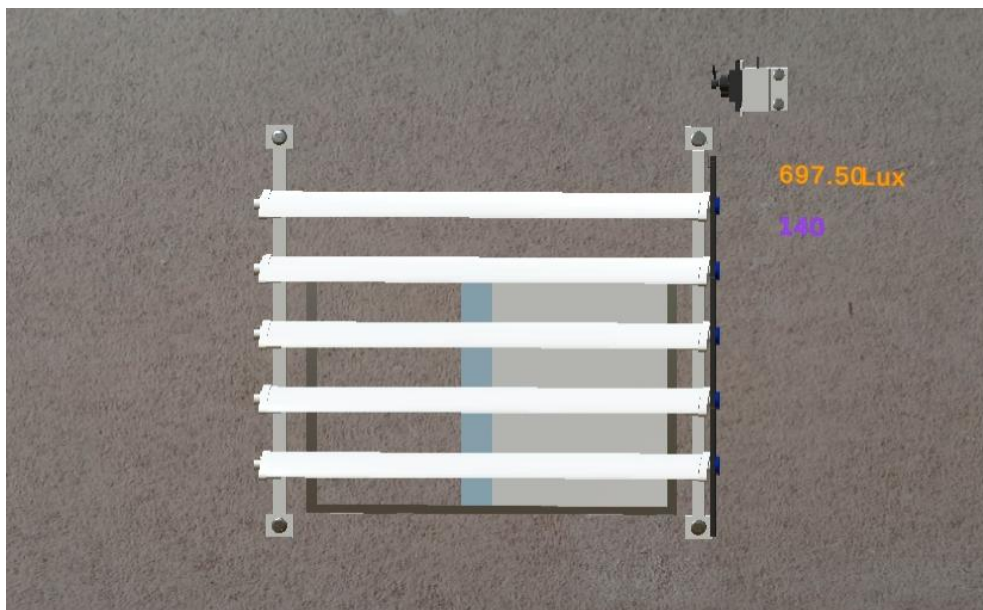
Figura 32 – Na cor laranja há a indicação de localização dos pivôs nos eixos de rotação.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Aos pivôs foram acrescentados componentes *scripts* (C#) para controlar a rotação e o recebimento de dados. No caso específico dos componentes *scripts* para controle das aletas (objetos filhos) vinculadas aos pivôs dos objetos cilíndricos foi utilizada uma equação para alterar a escala no intuito de ajustar a posição do ângulo para manter a referência de movimento do protótipo físico. Após as configurações, foi possível observar os dados sendo exibidos no protótipo do ambiente do estudo de caso digital e a versão do Brise adaptativo no digital realizando o movimento de acordo com o protótipo físico (Figura 33 e 34).

Figura 33 – Protótipo digital com os dados de iluminação e ângulo plotados em "tempo real".



Fonte: Elaborado pela autora no *software Unity* (2025).

Figura 34 – Dados de temperatura e umidade coletados em “tempo real” no ambiente do estudo de caso 3.



Fonte: Elaborado pela autora no *software Unity* (2025).

Figura 35 – Código QR para acesso ao vídeo do protótipo digital em funcionamento.



Fonte: Gerado via Google (2025).

Este subtópico apresentou a exemplificação de uma ação replicada no ambiente virtual a partir de dados coletados em tempo real. Apesar deste estudo trazer um protótipo de baixo custo com uso de ferramentas gratuitas, o motor de jogos *Unity* foi executado em um dispostio com uma GPU dedicada de 12 GB e uma CPU Intel Core i9, o que permitiu uma execução mais fluida. Porém, dependendo das configurações

de *hardware* do dispositivo usado, o tempo de execução da visualização da cena em “tempo real” pode variar bastante.

### 4.3 Discussão

A revisão da literatura incluiu artigos de anais de eventos, entre outros identificados na rede mundial de computadores, que não foram publicados por periódicos ou editoras. Apesar da possibilidade de existirem estudos tendenciosos, optou-se pela sua inclusão, pois a temática teve um aumento mais expressivo no uso do conceito há menos de sete anos (Alva; Biljecki; Stouffs, 2022).

Nem todas as pesquisas no campo do ambiente construído chegaram a apresentar um GD capaz de interagir com seu modelo físico. Algumas focaram em partes específicas como apenas na melhoria de representações digitais para GDs. Em relação ao BIM, é possível notar que os estudos de caso conseguem utilizar a integração de dados com as representações digitais desenvolvidas sobre a abordagem BIM, demonstrando seu potencial de integração complementar (Douglas; Kelly; Kassem, 2021).

A melhor condição, ainda na fase de planejamento dos ambientes a serem construídos, é realizar uma etapa de simulação, mas para casos de edifícios existentes, a simulação ainda sim pode ser uma boa estratégia para gerar *insights* e trabalhar melhorias no desempenho ambiental. Neste segundo caso, quando se tem a oportunidade de coletar dados em tempo real com dispositivos IoT e incorporá-los a simulações, isto pode aumentar a precisão baseada no contexto.

Esses dados, assim como observados nas pesquisas trazidas nas subseções tratadas neste trabalho, fazem parte da base do GD (Rafsanjani; Nabizade, 2021). Como exemplo, Ni *et al.* (2025), utilizaram 13 dispositivos (84 sensores) em um Castelo. Essa coleta de dados foi relevante para os autores constatarem que a umidade localizada no porão afetava não só a qualidade do ar, como também os andares superiores da edificação. Este monitoramento adicionalmente possibilitou entender riscos à materialidade e formular estratégias para controlar a temperatura interna e, deste modo, economizar energia (Ni *et al.*, 2025).

Em relação ao sistema de monitoramento exposto na subseção 4.2.2, os três dispositivos desenvolvidos com componentes comerciais de baixo custo tiveram um funcionamento adequado, atendendo à finalidade para a qual foram projetados. Apesar das intercorrências, exceto em 4 dados pontuais (causa desconhecida) essas não estavam diretamente relacionadas aos sensores ou ao microcontrolador, as principais estavam mais direcionadas a fatores externos como as precipitações, sinal da rede de internet, ou necessidade de troca da fonte de alimentação. Esperava-se redução na temperatura no ambiente de estudo do caso 3, uma vez que as variações não foram muito expressivas, mas o Brise realizou a função de controle que lhe foi determinado.

A escala 1:5, foi definida para viabilizar o uso de três cenários dos ambientes de estudo do caso 1, 2 e 3, possibilitando posicioná-los sobre uma cobertura de telha cerâmica para evitar interferências de sombra das outras edificações. Um dos desafios, foi a época do ano em que a coleta de dados foi realizada, pois, com as variações climáticas era necessário proteger os ambientes de estudo de caso fabricados em gesso acartonado, esse processo foi realizado utilizando: escadas, lonas e cordas. A amostra de dados coletada correspondeu a 20 dias consecutivos, em uma próxima versão dos dispositivos as fontes de alimentação podem ser substituídas por baterias, neste caso, o sistema precisou ser desligado durante as ocorrências de precipitações e todos os dias no período noturno.

Em relação às falhas pontuais de comunicação, foi evidente em alguns momentos no *Broker* um sinal fraco de rede dificultado a visualização dos dados que eram atualizados no modelo digital em “tempo real”, e, portanto, o reposicionamento do sistema do ambiente de estudo do caso 3, poderia encurtar a distância em relação ao receptor wi-fi, uma outra alternativa, seria a utilização de outro dispositivo receptor de rede intermediário.

Os estudos de Araújo *et al.* (2019), Fialho *et al.* (2022), Mariano *et al.* (2023), Martins *et al.* (2022) e Passos *et al.* (2022), também fizeram uso de componentes comerciais de baixo custo (microcontroladores, sensores, atuadores). Percebe-se que, apesar do uso destes componentes, um dos recursos que demandam investimento financeiro são os *softwares* comerciais (Fialho *et al.*, 2022). Destes estudos, a grande maioria utilizou a ferramenta *Autodesk Revit*, Mariano *et al.* (2023) e Passos *et al.* (2022), empregam também o *Rhinoceros + VisualArq*. Estas últimas

ferramentas em conjunto tendem a ser interessantes, pois, conseguem trabalhar com a abordagem BIM, com um valor de licença comercial única e possível de ser atualizada (pagando o valor reduzido da atualização) o que tende a ser um investimento de longo prazo. No caso deste estudo, a ferramenta utilizada em sua versão gratuita foi o motor de jogos *Unity*, não focando no uso de um modelo digital baseado na abordagem BIM.

Apesar do uso de ferramentas de acesso gratuito, assim como descrito em Nhamage (2023) e Martins *et al.* (2022), o desenvolvimento nos motores de jogos demandam mais configurações e podem não ter um fluxo de usabilidade tão intuitivo para profissionais que não estão habituados com essas plataformas, mas é evidente que há o interesse de uso pela capacidade de interação em “tempo real” além de inclusão de dados de fontes diversas (Dani *et al.*, 2023; Deng; Menassa; Kamat, 2023; Lee *et al.*, 2022; Mohammadi; Vimal; Taylor, 2020). Nesse estudo, a opção pelo uso da *Unity* levou esses fatores em consideração: a disponibilidade de acesso, possibilidade de comunicação com o protocolo *MQTT* e a interação em “tempo real”.

As principais dificuldades observadas durante o processo estiveram relacionadas à configuração das ações do modelo digital do brise por meio de componentes físicos. Pois essa seria a opção mais adequada na replicação dos movimentos, já que apenas um dos componentes faria uso do dado referente ao ângulo replicando a ação de maneira mais precisa. Dessa forma, não seriam necessárias correções adicionais para garantir o espelhamento fiel do movimento do Brise no protótipo físico.

Esse método também seria o ideal se o intuito fosse avaliar força ou tensão no modelo, o que não era o foco desta pesquisa, contudo, serão necessários mais testes para encontrar uma solução adequada com esse recurso. A abordagem final adotada apresentou a ação realizada no protótipo físico em “tempo real” atendendo ao propósito, mas, aumentou significativamente a quantidade de componentes que interagem com o valor do ângulo publicado pelo microcontrolador, ainda assim, pode-se inferir que esta seja uma solução mais interessante do que realizar a pré-configuração de diversas animações acionadas com valores do ângulo, tendo em vista que todos os componentes foram atualizados em simultâneo não havendo retardo.

De acordo com Pierce, Heeren e Hill (2023), cada GD terá suas próprias particularidades e capacidade. Os autores não enxergam a necessidade de

representações ricas em detalhes para o GDs, mas que essas representações devem ser funcionais. No contexto do patrimônio, por exemplo, ter um modelo digital preciso é extremamente relevante para registro documental do bem, e a mesma modelagem digital pode ser empregada em seu GD. Portanto, o entendimento do nível de representação do modelo também é variável. Para o caso de Delgado *et al.* (2023), a representação digital mais precisa foi relevante em suas simulações de eficiência energética.

O uso de modelos digitais interativos com protótipos físicos pode ser uma solução interessante na compreensão do funcionamento de sistemas no campo do ensino. Mas, assim como abordado em Kalantari *et al.* (2022), que trazem um conjunto de peças encaixáveis que espelham *layouts* no *software*, a depender dos casos, se os modelos tiverem estruturas mais rígidas podem não ser muito eficientes porque impõem limites nas interações, o que pode impactar a criatividade (Kalantari *et al.*, 2022).

O uso de “GDs” capacitados com diversos recursos tecnológicos (IoT, IA, Blockchain, AR etc) no ambiente construído quando aplicados às residências unifamiliares, por exemplo, em grande maioria não será uma opção economicamente viável, pois seu uso possui maior valor agregado para projetos maiores ou de alta complexidade, já que além da necessidade de sustentar a infraestrutura, quando seu desenvolvimento é realizado com múltiplas ferramentas será preciso fazer a manutenção periódica para garantir o pleno funcionamento e a segurança do sistema, haja visto o cenário de evolução das tecnologias digitais (Agostinelli *et al.*, 2021; Bortolini *et al.*, 2022; Peng *et al.*, 2020). Os GDs são pensados para sistemas complexos (Grieves, 2022):

A complexidade impulsiona a necessidade do gêmeo digital. Embora não seja algo totalmente definido, a partir de certo nível de possíveis estados do sistema e de troca e processamento de informações, os produtos passam a ser considerados complexos. Como costume dizer, uma aeronave caça a jato precisa de um gêmeo digital. Um clipe de papel, não (Grieves, 2022, p. 7, tradução nossa).

Portanto, se o intuito for mais focado no controle de ações em residências isoladas ou edifícios com pouco fluxo de pessoas e atividades com interesse em métodos automatizados com uso da IoT, o “GD” pode ser de pouca utilidade e oneroso.

Segundo Chacón *et al.* (2024, p., tradução nossa), “os canteiros de obras são complexos e dinâmicos”, conseqüentemente, o GD neste contexto pode demandar de um desenvolvimento exclusivo, notório na maior parte das aplicações. Sendo assim, não serão todos os sistemas de GDs possíveis de serem replicados mesmo para usos similares. Um exemplo que busca fornecer uma base para uso em outras edificações históricas é o GD paramétrico em Ni *et al.* (2025), que inclui soluções que permitem integrar a outras plataformas. Portanto, conhecer ferramentas e as soluções adotadas em outras pesquisas pode ser bastante relevante para tomar decisões assertivas nas escolhas dos métodos e processos para construção do GDs específicos.

Mokhtari, Panushev e McArthur (2022, p. 3, tradução nossa) enfatizam que para lidar com uso de diversos dados IoT em GDs Cognitivos são adotadas as abordagens de: dados vinculados e ontologias. No caso, as “ontologias fornecem estruturas de dados robustas”. O estudo Ni *et al.* (2025), utiliza essa abordagem para produzir seu modelo de GD paramétrico, com o intuito de permitir uma flexibilização na alteração das ferramentas que possam servir a outros estudos de caso semelhantes.

Esta pesquisa não discutiu sobre segurança no desenvolvimento de GDs, mas entende-se que apesar do potencial de integração entre o tangível e o digital, as questões de segurança devem ser levadas em consideração. Por exemplo, para sistemas mais amplos como GD de Cidades Inteligentes, concentrar dados/informações em um único lugar (centralizar) não é, intuitivamente, a opção mais segura. Na linha dos GDs cognitivos Mokhtari, Panushev e McArthur (2022), argumentam ser necessário ter uma rede separada para receber os dados IoT do GDs com a finalidade de aumentar aspectos de segurança. Para Lv, Cheng e Lv (2023), tendo em vista a capacidade bidirecional do GDs, entende-se que a segurança deve ir além das medidas padrões, e é até mesmo neste sentido que a perspectiva do uso da Blockchain aparece.

Com diversos impactos positivos para aprimorar a segurança, reduzir o desperdício de insumos, melhorar a logística no canteiro de obras, traçar rotas para transporte e organização de cronograma de construções modulares entre outras, o sistema GD armazenará dados de monitoramento constante dos trabalhadores. Esta é uma preocupação citada por Chacón *et al.* (2024), tendo em vista que dados sensíveis podem identificar as pessoas. Lee *et al.* (2022), também demonstraram preocupações semelhantes, e apesar de usarem dados de câmeras para entender a

mobilidade, optaram por trabalhar em seu sistema a não identificação de pessoas. Esta pode se tornar uma preocupação mais ampla com o monitoramento das cidades.

Nesta pesquisa foi apresentado um protótipo que exemplifica a interação físico-digital, realizando o monitoramento dos ambientes de caso com dispositivos desenvolvidos com recursos de baixo custo coletando dados de iluminação, temperatura e umidade. O sistema do protótipo foi usado como demonstração genérica; com isso, pode ser adotado para outras finalidades. Em relação ao uso para gestão, observado nos estudos supracitados, os dispositivos de monitoramento são úteis na coleta de dados para identificação e acompanhamento de patologias. O modelo digital interconectado, é um recurso visual detalhado, e pode, por exemplo, controlar o acionamento de lâmpadas através do modelo digital (GD) em tempo real<sup>13</sup>. Dessa forma, os dados coletados podem ser usados em sistemas interconectados como em edificações inteligentes para controlar o acionamento de variados dispositivos, viabilizando a economia de energia.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho demonstrou a relevância que o conceito de GD está recebendo no ecossistema de TICs aplicadas no ambiente construído, em relação aos objetivos eles foram alcançados com a demonstração da interação entre o protótipo físico e o digital. A adoção de componentes comerciais de baixo custo nos três dispositivos de monitoramento conseguiu atender às expectativas, o proveito do sistema está na capacidade de manter o controle da iluminação de acordo com o que lhe foi predeterminado, sendo possível acompanhar em “tempo real” no modelo digital as mudanças, as ferramentas utilizadas podem ser um ponto de partida para outros projetos com a adição de mais recursos.

De modo geral, é possível notar que o delineamento inicial dos fundamentos que compõem a base conceitual do GD, começou a ser exposto até pouco depois da primeira década do século XXI. Na literatura, em alguns casos o GD é compreendido

---

<sup>13</sup> Este processo é realizado de forma reversa, para ilustrar, um personagem em cena ou a visualização do mesmo em primeira pessoa interage com o modelo digital do interruptor que possui a função de enviar a mensagem de acordo com a interação, neste caso, se for acionada ocorre a visualização da lâmpada acesa no modelo 3D (virtual), e em simultâneo a mensagem de acionamento é enviada ao *Broker* que transmite para o dispositivo da lâmpada realizando o processo de acionamento da mesma (físico), e vice - verso.

como um Modelo Digital, se observada a primeira fase do ciclo de vida “Projeto e Construção” e a primeira fase do GD abordada por Grieves (2022) como “GD Protótipo”, o MD poderia ser entendido como um GD se possui-se uma série de informações necessárias e chega-se a ser materializado em algum momento. Entretanto, as menções no setor da construção são muito mais direcionadas a fase de “Operação e Manutenção”, e o paradigma da IoT acaba marcando presença nesta fase do ciclo de vida (operar/sustentar), pois, é através da IoT que se obtém a coleta de dados automatizada e a implementação de recursos de operação sobre os ambientes (Donno; Tange; Dragoni, 2019; Grieves, 2022; Moser; Harder; Koo, 2014; Nguyen e Adhikari, 2023; Rafsanjani e Nabizadeh, 2021).

Compreende-se que um GD atrelado a múltiplas tecnologias para o ambiente construído será mais adequado em contextos abrangentes pois são necessários investimentos financeiros para implementar e manter a infraestrutura (Agostinelli *et al.*, 2021; Bortolini *et al.*, 2022; Peng *et al.*, 2020). Embora o protótipo demonstre a viabilidade técnica da integração físico-digital, sua aplicação em processos de gestão, mais complexos, vai requerer mais ferramentas, escalabilidade e testes em ambiente real. Recomenda-se parcerias com empresas para implantar um modelo em uma edificação piloto.

É notório, nos estudos de caso o leque de ferramentas/*softwares* utilizadas e este estudo apresentou os ferramentais identificadas trazendo observações apontadas pelos autores para proporcionar um auxílio na identificação de plataformas com potencial de aplicação nos projetos, a ferramenta *Unity*, a mesma utilizada nesta pesquisa, desperta interesse entre os autores para uso em contextos mais amplos como de cidades. Apesar das possibilidades de adoção dos componentes de baixo custo na produção dos dispositivos de coleta de dados (IoT), o contraponto pode estar vinculado ao uso dos *softwares* comerciais (Fialho *et al.*, 2022), e a demanda por configurações de *hardware* mais robustas para manter o sistema ativo e fluido ao longo do ciclo de vida.

Na gestão, os autores viram vantagens no uso de GDs e IoT para tomada de decisões mais assertivas, o que traz melhorias no desempenho ambiental das edificações. O estágio mais avançado do GDs, engloba o uso de Inteligência Artificial para subsidiar análises preditivas e implementar ações autônomas, neste processo, a IoT vai manter a coleta de dados atualizada e registrar um histórico com a intenção

de ampliar a capacidade de aprendizagem contínua (Agostinelli *et al.*, 2021; Bojea *et al.*, 2020; Yitmen *et al.*, 2021; Yitmen, 2023).

No fim, os GDs precisam ser recurso para que peçoas que planejam e/ou fazem a gestão dos ambientes construídos, tomem decisões mais assertivas, com a finalidade de melhorar a qualidade de vida das peçoas. Em pesquisas futuras buscase dar continuidade às observações das aplicações de GDs, aprofundar os estudos nos elementos na *Unity*, incluindo sua integração com recursos de Realidade Aumentada. Além de realizar testes com outras ferramentas gratuitas e adotar modelos baseados na abordagem BIM.

## REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO 37122: Cidades e comunidades sustentáveis - Indicadores para cidades inteligentes. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO/CIE 8995-1: Iluminação de ambientes de trabalho – Parte 1: Interior. 1. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

AGOSTINELLI, S.; CUMO, F.; GUIDI, G.; TOMAZZOLI, C. Cyber-Physical Systems improving building energy management: digital twin and artificial intelligence. **Energies**, [s.l.], v. 14, n. 2338, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en14082338>. Acesso em: 6 fev. 2025.

AGOUZOUL, A.; TABAA, M.; CHEGARI, B.; SIMEU, E.; DANDACHE, A.; ALAMI, K. Towards a Digital Twin model for Building Energy Management: Case of Morocco. **Procedia Computer Science**, [s.l.], v. 184, p. 404 - 410, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050921006827>. Acesso em: 2 abr. 2025.

ALLAM, Z.; BIBRI, S. E.; JONES, D. S.; CHABAUD, D.; MORENO, C. Unpacking the '15-Minute City' via 6G, IoT, and Digital Twins: Towards a New Narrative for Increasing Urban Efficiency, Resilience, and Sustainability. **Sensors**, [s.l.], v. 22 n. 4, p. 1-17, fev. 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/4/1369>. Acesso em: 28 jul. 2022.

ALVA, P.; BILJECKI, F.; STOUFFS, R. USE CASES FOR DISTRICT-SCALE URBAN DIGITAL TWINS. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, [s.l.], v. XLVIII-4/W4-202, p. 5 -12, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-W4-2022-5-2022>. Acesso em: 16 fev. 2025.

ANDRADE, P. A. F. L.; GUIMARÃES, I. F. G. Desafios no uso do Digital Twin na Construção Pré-Fabricada – Uma Revisão Sistemática. **Revista Foco**, Curitiba, v.16, n. 8, p. 01-20, jul. 2023. Disponível em: <https://www.scilit.net/publications/2a287a6344dfa1b1f6a9c1dda9681429>. Acesso em: 29 dez. 2023.

ARAÚJO, C. S.; BATISTA, A. C. M. S.; LIMA, B. F. C.; FERREIRA, E. A. M. Integração de modelos físicos com modelos BIM utilizando IoT e Forge. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia da Informação e Comunicação na Construção. **Anais [...]**, Porto Alegre: ANTAC Campinas, v. 2, 2019. Disponível em: <https://www.antaceventos.net.br/index.php/sbtic/sbtic2019/paper/view/98>. Acesso em: 4 jan. 2024.

ASHTON, K. That ‘Internet of Things’ Thing. **RFID Journal**, [s.l.], 2009. Disponível em: <https://www.itrco.jp/libraries/RFIDjournal-That%20Internet%20of%20Things%20Thing.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2022.

BLENDER. **History**, s.d. a. Disponível em: <https://www.blender.org/about/history/>. Acesso em: 13 out. 2022.

BLENDER. **The Freedom to Create: Blender is Free and Open Source software**, Forever, s.d. b. Disponível em: <https://www.blender.org/about/>. Acesso em: 13 out. 2022.

BNDES - Banco nacional do desenvolvimento. Cartilha de Cidades. jan. 2018. Disponível em: [https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/transformacaodigital/arquivosinternetdascoisas/fase4\\_13\\_cartilha-de-cidades.pdf](https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/transformacaodigital/arquivosinternetdascoisas/fase4_13_cartilha-de-cidades.pdf). Acesso em: 9 jul. 2022.

BORTOLINI, R.; RODRIGUES, R.; ALAVI, H.; VECCHIA, L. F. D.; FORCADA, N. Digital Twins’ Applications for Building Energy Efficiency: A Review. **Energies**, v. 15, n. 7002, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/19/7002>. Acesso em: 3 mar. 2025.

BOJEA, C.; GUERRIERO, A.; KUBICKI, S.; REZGUI, Y. Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research. **Automation in Construction**, [s.l.], v. 114, p. 1-16, jun. 2020. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103179 114. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580519314785>. Acesso em: 2 jun. 2022.

BOLPAGNI, M; CIRIBINI, A. L. C; SIMEONE, D; COMAI, Sara; MASTROLEMBO, S; SANTAMARIA, M. Chapter 8 Semi-Autonomous Digital Twins to Support Sustainable Outcomes in Construction 4.0. In: YITMEN, I. (Org.). **Cognitive Digital Twins for Smart Lifecycle Management of Built Environment and Infrastructure: Challenges, Opportunities and Practices**. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 2023.

BRASIL. Decreto nº 9.854, 25 de 2019, 2019. Institui o Plano Nacional de Internet das Coisas e dispõe sobre a Câmara de Gestão e Acompanhamento do

Desenvolvimento de Sistemas de Comunicação Máquina a Máquina e Internet das Coisas. Diário Oficial: Brasília, 25 jun. 2019.

BRASIL. Estratégia Brasileira para Transformação Digital (E-Digital) Ciclo 2022 - 2016. 2022. Disponível em: [https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/transformacaodigital/arquivosestrategiadigital/e-digital\\_ciclo\\_2022-2026.pdf](https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/transformacaodigital/arquivosestrategiadigital/e-digital_ciclo_2022-2026.pdf). Acesso em: 1 dez. 2023.

BRASIL. Estratégia Brasileira para Transformação Digital. E-Digital. 2018. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/centrais-de-conteudo/comunicados-mcti/estrategia-digital-brasileira/estrategiadigital.pdf>. Acesso em: 16 maio 2022.

BROWN, Tim. **Design Thinking**: Uma metodologia poderosa para decretar o fim das velhas ideias. Edição do Kindle. Alta Books, 2020.

CANUTO, C. L.; SALGADO, M. S.; CODINHOTO, R. Gestão da conservação preventiva do patrimônio moderno através do HBIM-DT. **Patrimônio 4.0: conectando dimensões da realidade**, Goiânia: UFG, mar. de 2022. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/359766809\\_Gestao\\_da\\_conservacao\\_preventiva\\_do\\_patrimonio\\_moderno\\_atraves\\_do\\_HBIM-DT](https://www.researchgate.net/publication/359766809_Gestao_da_conservacao_preventiva_do_patrimonio_moderno_atraves_do_HBIM-DT). Acesso em: 26 out. 2023.

CESPEDES-CUBIDES, A. S.; JRADI, M. A review of building digital twins to improve energy efficiency in the building operational stage. **Energy Informatics**, [s.l.], v. 7, n. 11, 2024. Disponível em: <https://energyinformatics.springeropen.com/articles/10.1186/s42162-024-00313-7>. Acesso em: 25 mar. 2024.

CHACÓN, R.; POSADA, H.; RAMONELL, C.; JUNGSMANN, M.; HARTMANN, T.; KHAN, R.; TOMAR, R. Digital twinning of building construction processes. Case study: A reinforced concrete cast-in structure. **Journal of Building Engineering**, [s.l.], v. 84, p. 108522, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.108522>. Acesso em: 14 mar 2025.

CHAN, M.; ESTÈVE, D.; ESCRIBA, C.; CAMPO, E. A review of smart homes - Present state and future challenges. **Computer Methods and Programs in Biomedicine**, [s.l.], v. 91 n. 1, p. 55 - 81, 2008. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169260708000436?via%3Dihub>. Acesso em: 22 nov. 2023.

CHEN, S.; FAN, G.; LI, Jun. Improving completeness and accuracy of 3D point clouds by using deep learning for applications of digital twins to civil structures. **Advanced Engineering Informatics**, [s.l.], v. 58, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474034623003245>. Acesso em: 17 jun. 2024

CHEN, Y.-S.; CHIANG, W.-L. A Spiderweb-Based Massive Access Management Protocol for M2M Wireless Networks. **IEEE Sensors Journal**, [s.l.], v. 15, n. 10, p. 5765-5776, out. 2015. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7128676> Acesso em: 9 ago 2024.

CONDE, J.; MUNOZ-ARCENTALES, A.; ALONSO, Á.; LÓPEZ-PERNAS, S.; SALVACHÚA, J. Modeling Digital Twin Data and Architecture: A Building Guide With FIWARE as Enabling Technology. **IEEE Internet Computing**, [s.l.], v. 26, n. 3, p. 7-14, maio/jun. 2022. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9346030>. Acesso em: 3 out 2024.

CONNECTED ENVIRONMENTS. Extra: MQTT Client in Unity, s.d. Disponível em: <https://workshops.cetools.org/codelabs/CASA0019-unity-mqtt/#0>. Acesso em: 10 nov. 2024.

DANI, A. A. H.; SUPANGKAT, S. H.; LUBIS, F. F.; NUGRAHA, I. G. B. B.; KINANDA, R.; RIZKIA, I. Development of a Smart City Platform Based on Digital Twin Technology for Monitoring and Supporting Decision-Making. **Sustainability**, [s. l.], v. 15, n. 18, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/18/14002> . Acesso em: 24 abr. 2025.

DE ANGELIS, A.; SANTONI, F.; CARBONE, P.; CECCONI, M.; VECCHIETTI, A.; DI LORENZO, F. Development of an IoT Structural Monitoring System Applied to a Hypogeal Site. **Sensors**, [s.l.], v. 20, n. 23, p. 1-13, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/23/6769>. Acesso em: 15 nov. 2021.

DELGADO, J. M. P. Q.; GUIMARÃES, A. S.; MARTINS, J. P.; PARRACHO, D. F. R.; FREITAS, S. S.; LIMA, A. G. B.; RODRIGUES, L. BIM and BEM Interoperability – Evaluation of a Case Study in Modular Wooden Housing. **Energies**, [s.l.], v. 16, n. 4, p. 1579, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/4/1579>. Acesso em: 10 fev. 2025.

DENG, M. MENASSA, C. C; KAMAT, V. R. Chapter 7: Digital ID Framework for Human-Centric Smart Management of the Indoor Environment. *In: YITMEN, I. (Org.). Cognitive Digital Twins for Smart Lifecycle Management of Built Environment and Infrastructure: Challenges, Opportunities and Practices*. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 2023.

DONNO, M.; TANGE, K.; DRAGONI, N. Foundations and Evolution of Modern Computing Paradigms: Cloud, IoT, Edge, and Fog. **IEEE Access**, [s.l.], v. 7, p. 150936-150948, 2019. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8869772>. Acesso em: 20 nov. 2023.

DOUGLAS, D.; KELLY, G.; KASSEM, M. BIM, Digital Twin and cyber-physical systems: crossing and blurring boundaries. *In: Proceedings of the 2021 European Conference on Computing in Construction*, on-line, 2021. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2106.11030>. Acesso em: 14 ago. 2022.

EVANGELOU, T., GKELI, M., AND POTSIYOU, C. Building digital twins for smart cities: a case study in Greece. **ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, [s.l.], v. X-4/W2-2022, p. 61–68, 2022. Disponível em: <https://isprs-annals.copernicus.org/articles/X-4-W2-2022/61/2022/>. Acesso em: 20 jan. 2025.

FACELI, K.; LORENA, A. C.; GAMA, J.; CARVALHO, A. C. P. L. F. **Inteligência artificial: uma abordagem de aprendizado de máquina**. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

FIALHO, B.C.; CODINHOTO, R.; FABRICIO, M.M.; ESTRELLA, J.C.; RIBEIRO, C.M.N.; BUENO, J.M.d.S.; TORREZAN, J.P.D. Development of a BIM and IoT-Based Smart Lighting Maintenance System Prototype for Universities' FM Sector. **Buildings**, [s.l.], v. 12, n. 99, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-5309/12/2/99>. Acesso em: 11 dez 2024.

FONSECA, Aristides Perobelli; FANTIN, Natália Rosa; LOURENÇO, Sarah Victoria Gardenal; COSTALONGA, Álvaro Gotelip; SANTOS, LucasBarbosa Cardoso dos. Gêmeos digitais na esfera pública: uma experiência na graduação em arquitetura e urbanismo. *In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE O ENSINO DE BIM*, 2023. Porto Alegre: ANTAC, 2023. v. 5, p. 1–1, 2023. DOI: 10.46421/enebim.v5i00.3460. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/enebim/article/view/3460>. Acesso em: 5 out. 2024.

GALVÃO, G. A. de S.; CASTRO, H. G. de T.; COSTA, B. R. de B.; MICELI JUNIOR, G.; PELLANDA, P. C. Aplicação de Gêmeos Digitais em um Ambiente BIM de monitoramento de estruturas de edificações. *In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia da Informação e Comunicação na Construção*, 2023, Aracaju. Porto Alegre: ANTAC, 2023. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/sbtic/article/view/2590/2737>. Acesso em: 19 dez. 2023.

GARCIA, A.; GABALDE, B.; BORGES, G.; BRUZA, M.; SANTOS, E.; CORREA, F. Aplicação de gémeos digitais na indústria da construção – Estado da arte. *In: 4º Congresso Português De Building Information Modelling*. Portugal, v. 1, 2022. Disponível em: <https://ebooks.uminho.pt/index.php/uminho/catalog/view/32/132/1657-1>. Acesso em: 10 nov. 2023.

GELERNTER, D. Mirror Worlds?. *In: GELERNTER, D. Mirror Worlds: Or the Day Software Puts the Universe in a Shoebox...How It Will Happen and What It Will Mean*. Nova York: Oxford University Press, 1992.

GRIBAUDO, M.; IACONO, M.; LEVIS, A. H. An IoT-based monitoring approach for cultural heritage sites: The Matera case. **Concurrency Computat: Pract Exper**, [s.l.], v. 22, n. 11, p. 1-13, 2017. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cpe.4153>. Acesso em: 17 set. 2021.

GRIEVES, M. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication. 2014. Disponível em: <https://www.3ds.com/fileadmin/PRODUCTS-SERVICES/DELMIA/PDF/Whitepaper/DELMIA-APRISO-Digital-Twin-Whitepaper.pdf>. Acesso em: 11 ago. 2022.

GRIEVES, M. Intelligent digital twins and the development and management of complex systems. **Digital Twin**, [s.l.], v. 2, n. 8, p. 1-24, maio 2022. Disponível em: <https://digitaltwin1.org/articles/2-8>. Acesso em: 14 ago. 2022.

GRIEVES, M.; VICKERS, J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. *In*: KAHLEN, J., FLUMERFELT, S., ALVES, A. (org.). **Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems**. Springer, 2017. E-book. Disponível em: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-38756-7\\_4](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-38756-7_4). Acesso em: 1 jun. 2022.

GUSE, Rosana. **O que é servo motor?** *MakerHero*, Robotica, 22 jul. 2024. Disponível em: <https://www.makerhero.com/blog/o-que-e-servo-motor/>. Acesso em: 5 jul. 2025

HADJIDEMETRIOU, L.; STYLIANIDIS, N.; ENGLEZOS, D.; PAPADOPOULOS, P.; ELIADES, D.; TIMOTHEOU, S.; POLYCARPOU, M. M.; PANAYIOTOU, C. A digital twin architecture for real-time and offline high granularity analysis in smart buildings. **Sustainable Cities and Society**, v. 98, n. 104795, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670723004067> . Acesso em: 7 jun. 2024.

HASSO-PLATTNER INSTITUTE OF DESIGN. **An Introduction to Design Thinking**: PROCESS GUIDE. Stanford, 2010. Disponível em: <https://web.stanford.edu/~mshanks/MichaelShanks/files/509554.pdf>. Acesso em: 2 ago. 2024.

HOSAMO, H. H.; IMRAN, A.; CARDENAS-CARTAGENA, J.; SVENNEVIG, P. R.; SVIDT, K.; NIELSEN, H. K. A Review of the Digital Twin Technology in the AEC-FM Industry. **Hindawi Advances in Civil Engineering**, [s.l.], v. 2022, p. 1-17, mar. 2022. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/ace/2022/2185170/>. Acesso em: 18 jul. 2022.

HU, Ming. Smart Building and Current Technologies. *In*: HU, Ming. **Smart Technologies and Design For Healthy Built Environments**. Springer, 2021. E-book.

IBM. O que é blockchain?. IBM, s.d. a. Disponível em: <https://www.ibm.com/br-pt/topics/blockchain>. Acesso em: 28 jun. 2025.

IBM. O que é realidade aumentada?. IBM, s.d. b. Disponível em: <https://www.ibm.com/br-pt/think/topics/augmented-reality>. Acesso em: 28 jun. 2025.

IBM. O que é software de código aberto (open source)?. IBM, s.d. c. Disponível em: <https://www.ibm.com/br-pt/topics/open-source>. Acesso em: 28 jun. 2025.

JADDOH, A.; LOIZIDES, F.; LEE, J. RANA, O. An Interaction Framework for Designing Systems for Virtual Home Assistants and People with Dysarthria. **Univ Access Inf. Soc.**, [s.l.], v. 24, p. 267–279, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10209-023-01037-3>. Acesso em: 27 maio 2025.

JIAO, Y.; ZHAI, X.; PENG, L.; LIU, J.; LIANG, Y.; YIN, Z. A digital twin-based motion forecasting framework for preemptive risk monitoring. **Advanced Engineering Informatics**, [s.l.], v. 59, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2023.102250>. Acesso em: 3 nov. 2024.

KALANTARI, S.; POURJABAR, S.; XU, T. B.; KAN, J. Developing and user-testing a Digital Twins prototyping tool for architectural design. **Automation in Construction**, [s.l.], v. 135, p. 1-12, 2022. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580522000139?via%3Dihub>. Acesso em: 30 maio 2022.

KARATZAS, S.; LAZARI, V.; FOUSEKI, K.; PRACCHI, V. N.; BALASKAS, E. Digital twins-enabled heritage buildings management through social dynamics. **Journal of Cultural Heritage Management and Sustainable Development**, [s.l.], 2024.

Disponível em: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/jchmsd-08-2023-0136/full/html>. Acesso em: 11 maio 2025.

KHAJAVI, S. H.; TETIK, M.; LIU, Z.; KORHONEN, P.; HOLMSTRÖM, J. Digital Twin for Safety and Security: Perspectives on Building Lifecycle. **IEEE Access**, [s.l.], v. 11, p. 52339-52356, 2023. Disponível em:

<https://ieeexplore.ieee.org/document/10130166>. Acesso em: 7 abr. 2024.

KRITZINGER, W.; KARNER, M.; TRAAR, G.; HENJES, J.; SIHN, W. Digital Twin in manufacturing: A categoriacal literature review and classification. **IFAC PapersOnLine**, [s.l.], v. 51, n. 11, p. 1016-1022, 2018. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896318316021>. Acesso em: 14 nov. 2023.

LEE, A; LEE, K.-W; KIM, K.-H; SHIN, S.-W. A geospatial platform to manage large-scale individual mobility for an urban digital twin platform. **Remote Sensing**, [s. l.], v. 14, n. 3, p. 723, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/14/3/723>.

Acesso em: 23 abr. 2025.

LEE, D.; LEE, S. Digital Twin for Supply Chain Coordination in Modular Construction. **Appl. Sci.**, [s.l.], v. 11, n. 5909, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/13/5909>.

Acesso em: 20 mar 2024.

LEE, Y.; CHOI, M. H.; SONG, Y.- S.; LEE, J.- G.; PARK, J.Y.; LI, K.- J. Building an Indoor Digital Twin—A Use-Case for a Hospital Digital Twin to Analyze COVID-19 Transmission. **ISPRS Int. J. Geo-Inf.**, v. 13, n. 460, 2024. Disponível em:

<https://www.mdpi.com/2220-9964/13/12/460>. Acesso em: 16 abril 2025.

LEFTERI, C. **Como se faz: 92 técnicas de fabricação para design de produtos**. 2ª ed. Blücher, 2013.

LEHNER, H., DORFFNER, L. Digital geoTwin Vienna: Towards a Digital Twin City as Geodata Hub. **PFG**, v. 88, p. 63 –75, 2020. Disponível em:

<https://link.springer.com/article/10.1007/s41064-020-00101-4>. Acesso em: 23 set. 2024.

LESKO, J. **Design Industrial: Guia de Materiais e Fabricação**. 2a ed. Blücher, 2012.

LV, Z.; CHENG, C.; LV, H. Blockchain-Based Decentralized Learning for Security in Digital Twins. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 10, n. 24, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/4/3713>. Acesso em: 30 dez. 2023.

LYRA, P. H. C. de; KATAKURA, P.; MARTINS, A. C. A experiência com gêmeos digitais: integração do BIM com o IoT. *In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE O ENSINO DE BIM*, 4., 2022. Anais [...]. Porto Alegre: ANTAC, 2022. p. 1–1. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/enebim/article/view/1937>. Acesso em: 23 maio. 2025. Acesso em: 13 out. 2023.

MACHADO, S. C. Análise Sobre o Uso das Tecnologias Digitais da Informação e Comunicação (Tdics) no Processo Educacional da Geração Internet. **Revista Novas Tecnologias na Educação**, Porto Alegre, v. 14, n. 2, 2016. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/index.php/renote/article/view/70645>. Acesso em: 3 jan. 2024.

MARIANO, P. O. P.; SILVA, F. B. L.; SÔNEGO, Y. S.; VAZ, C. E. V.; CUPERSCHMID, A. R. M. A Low-cost Sensor for Slope and Risk Areas Monitoring: Using a Digital Twin for Landslide Prevention. *In: SIGraDi 2023, Accelerated Landscapes*, 2023, Centro Universitario Regional Este (CURE) Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo, Universidad de la República. Anais ... p. 1443 – 1454, 2023. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/378235013\\_A\\_Low-cost\\_Sensor\\_for\\_Slope\\_and\\_Risk\\_Areas\\_Monitoring\\_Using\\_a\\_Digital\\_Twin\\_for\\_Landslide\\_Prevention](https://www.researchgate.net/publication/378235013_A_Low-cost_Sensor_for_Slope_and_Risk_Areas_Monitoring_Using_a_Digital_Twin_for_Landslide_Prevention). Acesso em: 13 abr. 2024.

MARQUES, S. Y. P.; GONÇALVES, P. H.; SCHAITL, S. P. Reflexões Sobre Gêmeos Digitais (GD) No Ambiente Construído. **Revista Jatobá**, Goiânia, v. 4, 2022. DOI: 10.5216/revjat.v4.74705. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/revjat/article/view/74705>. Acesso em: 11 dez. 2023.

MARTINS, J. P. M; B.; LYRA, P. H. C. Gêmeos Digitais na Biblioteca do IMT: Monitoramento e Gestão Eficiente de Edificações, **Instituto Mauá de Tecnologia**, [s.l.], [2022?]. Disponível em: <https://maua.br/files/boneli-lyra-1670868889.pdf>. Acesso em: 3 jan. 2024.

MARTINS, P. N.; PEREIRA, G.; SANHUDO, L.; COSTA, A. A. Digital Twin para a gestão inteligente de edifícios: o caso do Smart Office do Built Colab. *In: 4º Congresso Português De Building Information Modelling*, 2022, Portugal. Anais [...] Portugal: [s.n.], 2022. p. 494-505. Disponível em: <https://ebooks.uminho.pt/index.php/uminho/catalog/view/32/132/1655-1>. Acesso em: Acesso em: 9 nov. 2023.

MATHWORKS. ThingSpeak The IoT Platform with MATLAB Analytics. MATLAB, s.d. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/thingspeak/>. Acesso em: 17 de jul de 2022.

MILLER, C.; ABDELRAHMAN, M.; CHONG, A.; BILJECKI, F.; QUINTANA, M.; FREI, M.; CHEW, M.; WONG, D. The Internet-of-Buildings (IoB) — Digital twin convergence of wearable and IoT data with GIS/BIM. *In: CISBAT 2021 Carbon-neutral cities - energy efficiency and renewables in the digital era*, 2021, Lausanne: Suíça.

Journal of Physics: Conference Series, n. 2042, 2021. DOI: 10.1088/1742-6596/2042/1/012041. Acesso em: 22 mar. 2025.

MISHRA, B.; KERTESZ, A. The use of MQTT in M2M and IoT systems: a survey. **IEEE Access**, v. 8, p. 201071-201086, 2020. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9247996>. Acesso em: 11 nov. 2024.

MOHAMMADI, N.; VIMAL, A.; TAYLOR, J. E. Knowledge Discovery in Smart City Digital Twins. *In: HAWAII INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEM SCIENCES*, ed. 53, 2020. Anais... Disponível em: <https://hdl.handle.net/10125/63943>. p. 1656-1664. Acesso em: 9 dez. 2024.

MOHAMMED, B. H.; SALLEHUDIN, H.; MOHAMED, S. A.; SATAR, N. S. M.; A. H.; HUSSAIN, B. Internet of Things-Building Information Modeling Integration: Attacks, Challenges, and Countermeasures, **IEEE Access**, [s.l.], v. 10, p. 74508-74522, 2022. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9828028>. Acesso em: 1 nov. 2023.

MOKHTARI, K. E; PANUSHEV, I.; MCARTHUR, J. Development of a Cognitive Digital Twin for Building Management and Operations. **Frontiers in Built Environment**, v. 8, 2022. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/built-environment/articles/10.3389/fbuil.2022.856873/full>. Acesso em: 8 maio 2025.

MOSER, K.; HARDER, J.; KOO, S. G. M. Internet of things in home automation and energy 102win102ing102 smart home 102win102ing102ili. **IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)**, San Diego: USA, p. 1260-1265, 2014. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6974087>. Acesso em: 14 dez. 2023.

MURPHY, M.; McGOVERN, E.; PAVIA, S. Historic Building Information Modelling – Adding intelligence to laser and image based surveys of European classical architecture. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 76, p. 89-102, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271612002079>. Acesso em: 9 maio 2025.

NATIVI, S.; MAZZETTI, P.; CRAGLIA, M. Digital Ecosystems for Developing Digital Twins of the Earth: The Destination Earth Case. **Remote Sensing**, [s.l.], v. 13, n. 11, p. 1-25, 2021. Disponível: <https://www.mdpi.com/2072-4292/13/11/2119>. Acesso em: 30 maio 2022.

NGUYEN, T. D.; ADHIKARI, S. The Role of BIM in Integrating Digital Twin in Building Construction: A Literature Review. **Sustainability**, [s.l.], v.15, n. 10462, p. 2-26, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/13/10462>. Acesso em: 31 out. 2023.

NHAMAGE, I. A. Development of BIM-Based Digital Twin Model for Fatigue Assessment in Metallic Railway Bridges. **U.Porto Journal of Engineering**, [s.l.], v. 9, n. 5, p. 12-23, 2023. Disponível em:

[https://journalengineering.fe.up.pt/index.php/upjeng/article/view/2183-6493\\_009-005\\_001565](https://journalengineering.fe.up.pt/index.php/upjeng/article/view/2183-6493_009-005_001565). Acesso em: 5 set 2023.

NI, Z.; HUPKES, J.; ERIKSSON, P.; LEIJONHUFVUD, G.; KARLSSON, M.; GONG, S. Parametric Digital Twins for Preserving Historic Buildings: A Case Study at Löfstad Castle in Östergötland, Sweden. **IEEE Access**, [s.l.], v. 13, p. 3371-3389, 2025. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10820352>. Acesso em: 22 maio 2025.

NI, Z.; LIU, Y.; KARLSSON, M.; GONG, S. Enabling Preventive Conservation of Historic Buildings Through Cloud-Based Digital Twins: A Case Study in the City Theatre, Norrköping. **IEEE Access**, [s.l.], v. 10, p. 90924-90939, 2022. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9868776>. Acesso em: 15 set. 2023.

NIKOUI, T. S.; RAHMANI, A. M.; BALADOR, A.; JAVADI, H. H. S. Internet of Things architecture challenges: A systematic review. **International 103win103i of communication systems**, [s.l.], v. 34, n. 4, p. 1-42, dez. 2020. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/dac.4678>. Acesso em: 4 abr. 2022.

NODE FORUM. Simon Weckert. Node, s. d. Disponível em: <https://nodeforum.org/people/simon-weckert/>. Acesso em: 28 jun. 2025

PAIVA, T. N.; NOGUEIRA, C. C. Estudo comparativo das principais tecnologias de impressão 3D no Brasil. **JNT-Facit Business And Technology Journal**, [s.l.], v. 1, n. 24, p. 193 – 212, 2021. Disponível em: <http://revistas.faculdefacit.edu.br/index.php/JNT/article/view/901>. Acesso em: 16 nov. 2023.

PAN, Y.; ZHANG, L. A BIM-data mining integrated digital 103win framework for advanced 103win103in management. **Automation in Construction**, [s.l.], v. 124, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580521000157>. Acesso em: 19 out. 2024.

PASSOS, F. W.; BITENCOURT, E.; SANSÃO, M. M.; MARIANO, P. O. P.; VAZ, C. E. V. Home automation: 103win103ing103il with water monitoring device. *In: Xxvi International Conference of the Iberoamerican Society of Digital Graphics*, 2023, São Paulo. Anais... São Paulo: Blucher, 2023. P. 529-540. Disponível em: <https://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/home-automation-experiment-with-water-monitoring-device-38518>. Acesso em: 15 nov. 2023.

PENG, Y.; ZHANG, M.; YU, F.; XU, J.; GAO, S. Digital Twin Hospital Buildings: Na Exemplary Case Study through Continuous Lifecycle Integration. **Advances in Civil Engineering**, v. 2020, n. 8846667, 2020. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/ace/2020/8846667/>. Acesso em: 19 fev. 2024.

PEREIRA, G. R.; GASI, F.; LOURENÇO, S. R. Review, Analysis, and Classification of 3D Printing Literature: Types of Research and Technology Benefits. **International Journal of Advanced Engineering Research and Science**, [s.l.], v. 6, n. 6, p. 167-187, 2019. Disponível em: <https://ijaers.com/detail/review-analysis-and-classification->

of-3d-printing-literature-types-of-research-and-technology-benefits/. Acesso em: 18 nov. 2023.

PIERCE, G. J.; HEEREN, J. D.; HILL, T. R. Orion SysML Model, Digital Twin, and Lessons Learned for Artemis I. *In: INCOSE INTERNATIONAL SYMPOSIUM*, n. 33, 2023, Honolulu, HI, USA. Anais... 2023. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20220017217/downloads/Orion%20Digital%20Twin%20v9.pdf>. Acesso em: 6 abr. 2024.

PINOCHET, L. H. C; ROMANI, G. F.; SOUZA, C. A.; RODRÍGUEZ-ABITIA, G. Intention to live in a smart city based on its characteristics in the perception by the 104win104 public. **Revista de Gestão**, [s.l.], v. 26, n. 1, p. 73-92, 2018. Disponível em: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/REGE-06-2018-0077/full/html>. Acesso em: 17 nov. 2023.

PLOENNIGS, J.; BA, A.; BARRY, M. Materializing the Promises of Cognitive IoT: How Cognitive Buildings Are Shaping the Way. **IEEE Internet of Things Journal**, [s.l.], v. 5, n. 4, p. 2367-2374, 2018. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8047951>. Acesso em: 13 dez. 2023.

PREGNOLATO, M.; GUNNER, S.; VOYAGAKI, E.; DE RISI, R.; CARHART, N.; GAVRIEL, G.; TULLY, P.; TRYFONAS, T.; MACDONALD, J.; TAYLOR, C. Towards Civil Engineering 4.0: Concept, workflow and application of Digital Twins for existing infrastructure. **Automation in Construction**. [s.l.], v. 141, n. 104421, set. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580522002941>. Acesso em: 21 nov. 2023.

RAFSANJANI, H. N.; NABIZADEHB, A. H. Towards digital architecture, engineering, and construction (AEC) industry through virtual design and construction (VDC) and digital 104win. **Energy and Built Environment**, [s.l.], v. 4. N. 2, p. 1-10, nov. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S266612332100060X>. Acesso em: 12 maio 2022.

REFFAT, R. Revitalizing architectural design studio teaching using ICT: Reflections on practical implementations. **International Journal of Education and Development using Information and Communication Technology**, [s.l.], v. 3, n. 1, p. 39-53, 2007. Disponível em: <http://ijedict.dec.uwi.edu/viewarticle.php?id=276&layout=html>. Acesso em: 2 jan. 2023.

RIAZ, K.; MCAFEE, M.; GHARBIA, S.S. Management of Climate Resilience: Exploring the Potential of Digital Twin Technology, 3D City Modelling, and Early Warning Systems. **Sensors**, v. 23, n. 5, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/5/2659>. Acesso em: 9 mar. 2025.

SADRI, H.; YITMEN, I.; TAGLIABUE, L. C.; WESTPHAL, F.; TEZEL, A.; TAHERI, A.; SIBENIK, G. Integration of Blockchain and Digital Twins in the Smart Built Environment Adopting Disruptive Technologies – A Systematic Review.

**Sustainability**, [s.l.], v. 15, n. 3713, p. 1-46, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/4/3713>. Acesso em: 28 dez. 2023.

SANTOS, B. P.; SILVA, L. A. M.; CELES, C. S. F. S.; BORGES NETO, J. B.; PERES, B. S.; VIEIRA, M. A. M.; VIEIRA, L. F. M.; GOUSSEVSKAIA, O. N.; LOUREIRO, A. A. F. Internet das coisas: da teoria à prática. *In: Minicursos SBRC-Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, v. 31, p. 16, 2016. Disponível em: <https://homepages.dcc.ufmg.br/~mmvieira/cc/papers/internet-das-coisas.pdf>. Acesso em: 5 dez. 2023.

SCHROTTER, G.; HÜRZELER, C. The Digital Twin of the City of Zurich for Urban Planning. **PFG**, [s.l.], n. 88, p. 99–112, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s41064-020-00092-2>. Acesso em: 4 fev. 2025.

SEPASGOZAR, S. M. E. Differentiating Digital Twin from Digital Shadow: Elucidating a Paradigm Shift to Expedite a Smart, Sustainable Built. **Buildings**. [s.l.], v.11, n. 4, p. 1-16, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-5309/11/4/151/htm>. Acesso em: 18 maio 2022.

SHARIFI, A.; BERIS, A. T.; JAVIDI, A. S.; NOURI, M.; LONBAR, A. G.; AHMADI, M. Application of artificial intelligence in digital 105win models for stormwater infrastructure systems in smart cities. **Advanced Engineering Informatics**, [s.l.], v. 61, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1474034624001332>. Acesso em: 9 mar. 2025.

SILVA, R, F; PANIAGO, R, N. A INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NÃO É INTELIGENTE NEM ARTIFICIAL: A CRÍTICA DE NICOLELIS E A ALFABETIZAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA PARA DESVELAR A NATUREZA DESSA TECNOLOGIA. **Revista Interinstitucional Artes de Educar**, [s.l.], v. 11, n. 1, p. 411–425, 2025. DOI: 10.12957/riae.2024.86194. Disponível em: <https://www.e-publicacoes.uerj.br/riae/article/view/86194>. Acesso em: 12 mar 2025.

STEINMETZ, C.; SCHROEDER, G. N.; BINOTTO, A.; PANIKKAR, S.; PAPENFUß, B.; SCHMIDT, C.; RETTBERG, A.; PEREIRA, C. E. Digital Twins modeling and simulation with Node-RED and Carla. **IFAC-PapersOnLine**, [s.l.], v. 55, n. 19, p. 97-102, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896322014057>. Acesso em: 2 mar. 2025.

STURM, R.; POLLARD, C.; CRAIG, J. Application Management in the Internet of Things. *In: STURM, R.; POLLARD, C.; CRAIG, J. Application Performance Management (APM) in the Digital Enterprise: Managing Applications for Cloud, Mobile, IoT* 105win105ing105ilit. P.199-209, 2017. 1. Ed. [s.l.]: Morgan Kaufmann, 2017.

TAGLIABUE, L. C.; RE CECCONI, F.; MALTESE, S.; RINALDI, S.; CIRIBINI, A. L. C.; FLAMMINI, A. Leveraging digital 105win for 105win105ing105ility assessment of

na educational 106win106ing. **Sustainability**, [s.l.], v. 13, n. 480, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/2/480>. Acesso em: 8 dez. 2024.

TAIVALSAARI, A.; MIKKONEN, T. Cloud Technologies for the Internet of Things: Defining a Research Agenda Beyond the Expected Topics. *In: **Euromicro Conference on Software Engineering and Advanced Applications***, 2015. [s.l.], IEEE, p. 484 – 488, 2015. Disponível em: <https://www.computer.org/csdl/proceedings-article/seaa/2015/7585a484/12OmNzayN8k>. Acesso em: 18 ago. 2022.

TANJI, T. Com um carrinho de mão e 99 celulares, artista “cria” engarrafamento no Google Maps em ruas vazias. **Grupo Globo**, 04 fev. 2020. Disponível em: <https://autoesporte.globo.com/carros/noticia/2020/02/com-um-carrinho-de-mao-e-99-celulares-artista-cria-engarrafamento-no-google-maps-em-ruas-vazias.ghtml>. Acesso em: 29 out. 2023.

TITA, E. E.; WATANABE, G.; SHAO, PEILUN; ARII, KENJI. Development and Application of Digital Twin–BIM Technology for Bridge Management. **Appl. Sci.**, [s.l.], v. 13, n. 7435, p. 1- 22, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/13/7435>. Acesso em: 13 dez. 2023.

TOLEDO, A. L. L.; CLEMENTE, J. C.; LIMA, M. C. R. de O.; SILVA, N. L. L., DA SILVA, A. A.; DA SILVA, A. F. Uso de gêmeos digitais aplicados a projeto de extensão no ensino de engenharia civil – estudo de caso de restauração de casa sede de assentamento rural. **OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA**, [s.l.], v. 22, n.1, p. 4343–4360, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.55905/oelv22n1-229>. Acesso em: 13 ago. 2024.

TRENTO, A.; WURZER, G.; CORAGLIA, U. M. A digital 106win for directing people flow in preserved heritage buildings. *In: SOUSA, J. P.; HENRIQUES, G. C.; XAVIER, J. P. (orgs.). **Proceedings of 37 eCAADe and XXIII SIGraDi Joint Conference: Architecture in the Age of the 4th Industrial Revolution, Porto***, 2019. São Paulo: Blucher, p. 561-568, 2019. Disponível em: <https://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/34213>. Acesso em: 9 jul 2024.

VALERI, Vitor. **O que é um motor de jogo?** E um motor gráfico? Terra, 18 maio 2023. Disponível em: <https://www.terra.com.br/byte/o-que-e-um-motor-de-jogo-e-um-motor-grafico,bf61968b6b5fbd288cb9a5164e9ab27f56kgaha8.html>. Acesso em: 5 jul. 2025.

VARMA, G.; CHAUHAN, R.; YAFI, E. ARTYCUL: A Privacy-Preserving ML Driven Framework to Determine the Popularity of a Cultural Exhibit on Display. **Sensors**, [s.l.], v. 21, n. 4, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/4/1527>. Acesso em: 5 dez. 2021.

VENKATESH, A. Computers and Other Interactive Technologies for the Home. **Communications of the ACM**. [s.l.], v. 39, n. 12, p.47-54, dez. 1996. Disponível em: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/240483.240491>. Acesso em: 22 nov. 2023.

WHITE, G.; ZINK, A.; CODECÁ, L.; CLARKE, S. A digital twin smart city for citizen feedback. **Cities**, [s.l.], v. 110, e103064, 2021. Disponível em:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0264275120314128>. Acesso em: 18 abr. 2025.

XIE, H.; XIN, M.; LU, C.; XU, J. Knowledge map and forecast of digital twin in the construction industry: State-of-the-art review using scientometric analysis. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 383 n. 135231, p. 1-18, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652622048053?via%3Dihub>. Acesso em: 30 out. 2023.

YITMEN, I. Introduction. *In*: YITMEN, I. (Org.). **Cognitive Digital Twins for Smart Lifecycle Management of Built Environment and Infrastructure: Challenges, Opportunities and Practices**. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 2023.

YITMEN, I.; ALIZADEHSALEHI, S. Synopsis of Construction 4.0-based Digital Twins to Cognitive Digital Twins. *In*: YITMEN, I. (Org.). **Cognitive Digital Twins for Smart Lifecycle Management of Built Environment and Infrastructure: Challenges, Opportunities and Practices**. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 2023.

YITMEN, I.; ALIZADEHSALEHI, S.; AKINER, I.; AKINER, M. E. An Adapted Model of Cognitive Digital Twins for Building Lifecycle Management. **Applied Sciences**, [s.l.], v. 11, n. 9, p. 1-22, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/9/4276>. Acesso em: 2 ago. 2022.

ZEB, S.; MAHMOOD, A.; HASSAN, S. A.; PIRAN, M. J.; GIDLUND, M.; GUIZANI, M. Industrial digital twins at the nexus of NextG wireless networks and computational intelligence: A survey. **Journal of Network and Computer Applications**, [s. l.], v. 200, p. 103309, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1084804521002988?via%3Dihub>. Acesso em: 30 mar. 2023.

ZHAO, L.; ZHANG, H.; WANG, Q.; WANG, H. Digital-Twin-Based Evaluation of Nearly Zero-Energy Building for Existing Buildings Based on Scan-to-BIM. **Advances in Civil Engineering**, [s. l.], v. 2021, n. 6638897, p. 1-11, 2021. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2021/6638897>. Acesso em: 11 maio de 2025.