



**Politécnico
de Viseu**

Escola Superior
de Tecnologia
e Gestão de Viseu

Digital Twin para monitorização e controle das condições ambientais interiores em edifícios – caso de estudo da ESTGV

Ana Paula Viegas

Dissertação

Mestrado em Engenharia de Construção e Reabilitação

Trabalho efetuado sob a orientação de
Professor Doutor Ricardo Manuel dos Santos Ferreira de Almeida
Professor Doutor José Alberto Cerri

Maio de 2026



**Politécnico
de Viseu**

Escola Superior
de Tecnologia
e Gestão de Viseu

Digital Twin para monitorização e controlo das condições ambientais interiores em edifícios – caso de estudo da ESTGV

Ana Paula Viegas

Dissertação

Mestrado em Engenharia de Construção e Reabilitação

Trabalho efetuado sob a orientação de

Professor Doutor Ricardo Manuel dos Santos Ferreira de Almeida
Professor Doutor José Alberto Cerri

Maio de 2026

Dedico este trabalho ao meu querido amigo Fred, que esteve ao meu lado por 14 anos, me dando amor, companhia e alegria. Sua presença foi meu alicerce durante tantas jornadas e sua memória e o carinho que sempre me ofereceu continuam vivos em meu coração.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar quero agradecer a Deus pela dádiva da vida.

Gostaria de expressar minha gratidão aos meus pais, Solange e António, que por seu amor e carinho me proporcionaram a oportunidade de me dedicar exclusivamente ao aprendizado durante esse percurso acadêmico. Também por serem fontes de inspiração.

À minha irmã Julia, quem eu sempre admirei e me inspirei e esteve ao meu lado em todos os momentos da minha vida, pelo companheirismo, pelas trocas de ideias e pela ajuda em todas as dificuldades.

Ao Willian, que me apoiou, incentivou e me deu suporte para realizar os meus sonhos e objetivos. Além de ser uma grande inspiração para mim e fonte de coragem e determinação para enfrentar as dificuldades.

À minha família, minha avó Ana e minhas tias e tios: Yolanda, Madi, Abílio e Hilário, que cuidaram de mim, aos amigos que fiz na academia e na vida e aos meus animaizinhos: Fred, Richard, Missy e Raj. Tenho muita sorte de ter todos vocês em minha vida.

Ao meu orientador, Professor Doutor Ricardo Manuel dos Santos Ferreira de Almeida, por todo tempo disponibilizado, pelo apoio, motivação e pela partilha de conhecimento e sugestões no decorrer do trabalho. Ao meu coorientador, Professor Doutor José Alberto Cerri, por todo apoio durante minha jornada acadêmica, o incentivo e tempo que disponibilizou em todas as conversas e conselhos.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná, que me proporcionou a oportunidade de aprendizado, dentro e fora de sala de aula, pela possibilidade de participar do programa de Dupla Diplomação. Ao Instituto Politécnico de Viseu que me recebeu e proporcionou acesso à novos conhecimentos, além de permitir viver essa experiência que vai além dos conhecimentos partilhados academicamente.

A todos, meu muito obrigada!

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo explorar o potencial de um modelo *digital twin* para monitorizar as condições ambientais interiores dos edifícios. Procurando-se compreender e demonstrar os melhores procedimentos e tecnologias disponíveis para uso, analisou-se a sua viabilidade de implementação num modelo do edifício da ESTGV.

Inicialmente foi realizada uma revisão bibliográfica sobre o tema, pesquisando também estudos de caso com informação sobre as várias etapas que são necessárias e, desta forma, suportar e viabilizar o presente trabalho. Após esta fase, realizou-se o levantamento tridimensional do edifício recorrendo a técnicas de captura da realidade, a implementação do sistema de sensorização e, por fim, a criação do modelo *digital twin*.

A partir da execução das tarefas da vertente prática do trabalho, procurou-se sistematizar a informação através de uma descrição metódica e didática dos procedimentos adotados. Pretende-se assim documentar as etapas e facilitar o desenvolvimento de modelos de *digital twin* noutras esferas de conhecimento e de implementação.

Os resultados alcançados demonstram o potencial da metodologia adotada para a criação do modelo, não deixando de evidenciar as dificuldades e as limitações encontradas no percurso bem como um paralelo com as informações e experiências encontradas na revisão bibliográfica.

Em síntese, o presente trabalho permitiu compreender a complexidade associada a um modelo digital integrado com vista à criação de um *digital twin*. Por outro lado, foi possível explorar o potencial das tecnologias emergentes nomeadamente no que se refere à captura de realidade. Por fim, foi possível identificar áreas de atuação e desenvolvimento com potencial de pesquisa e aprimoramento em trabalhos futuros.

Palavras-chave: Gémeo Digital; Fotogrametria; Sensorização; Captura de realidade.

ABSTRACT

This study aims to explore the potential of a digital twin model to monitor indoor environmental conditions in buildings. Seeking to identify and demonstrate the best available procedures and technologies, the feasibility of its implementation was analyzed through a model of the ESTGV building.

Initially, a literature review was conducted on the topic, including case studies that provided information on the various stages required to support and substantiate the present work. Following this phase, a three-dimensional survey of the building was carried out using reality capture techniques, followed by the implementation of a sensor system and, finally, the creation of the digital twin model.

From the execution of the practical component, the information was systematized through a methodical and didactic description of the adopted procedures. The aim is to document the stages and facilitate the development of digital twin models in other domains of knowledge and application.

The results obtained demonstrate the potential of the adopted methodology for model creation, while also highlighting the difficulties and limitations encountered throughout the process, as well as parallels with the insights and experiences identified in the literature review.

In summary, this work made it possible to understand the complexity associated with an integrated digital model aimed at creating a digital twin. Furthermore, it enabled the exploration of the potential of emerging technologies, particularly those related to reality capture. Finally, it was possible to identify areas for action and development with potential for further research and improvement in future studies.

Keywords: Digital Twin; Photogrammetry; Sensor System; Reality Capture.

ÍNDICE GERAL

ÍNDICE DE TABELAS / QUADROS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
LISTA DE SIGLAS / ABREVIATURAS	x
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos do trabalho	1
1.3 Abordagem Metodológica	2
1.4 Estrutura da dissertação	3
2. ESTADO DA ARTE	4
2.1. Fotogrametria Digital	4
2.1.1. Conceito e História	4
2.1.2. Fotogrametria Passiva (imagens) x Fotogrametria Ativa (LIDAR).....	5
2.1.3. Utilizações da Fotogrametria	5
2.1.4. Utilizações da Fotogrametria na Indústria AEC	6
2.1.4.1. O Caso do Convento / Escola de Santa Clara de Évora.....	6
2.1.4.2. O Caso do Mosteiro de Alcobaça	8
2.1.5. Benefícios e Limitações da Utilização de Drones	9
2.1.6. Limitações da Fotogrametria	10
2.1.7. Tendências Futuras da Fotogrametria	11
2.2. Digital Twin	12
2.2.1. Conceito e História	12
2.2.2. Digital Twin x BIM.....	12
2.2.3. Utilizações do Digital Twin na Indústria AEC.....	14
2.2.3.1. O Caso do Museu do Ipiranga	16
2.2.3.2. O caso da Samsung C&T.....	17
2.2.4. Classificações do Digital Twin	20
2.2.5. Tendências Futuras do Digital Twin.....	21
3. METODOLOGIA	22
3.1. O Espaço de Interesse	22
3.2. Fase I – Captura de realidade	24
3.2.1. Equipamentos	24
3.2.2. Ferramentas e Softwares	25

3.2.3.	Métodos.....	27
3.3.	Fase II – Sensorização.....	28
3.3.1.	Equipamentos.....	28
3.3.2.	Softwares.....	31
3.3.3.	Métodos.....	31
3.4.	Fase III – Digital Twin.....	32
3.4.1.	Softwares.....	33
3.4.2.	Métodos.....	34
4.	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	36
4.1.	Considerações Iniciais.....	36
4.2.	Fase I – Captura de realidade	36
4.2.1.	Levantamento Externo	36
4.2.2.	Levantamento Interno	38
4.3.	Fase II - Sensorização	45
4.3.1.	Configurações – Sensores	45
4.3.2.	Configurações – Home Assistant	47
4.4.	Fase III – Digital Twin.....	48
4.4.1.	Integração do Modelo 3D com o Autodesk Tandem.....	48
4.4.2.	Integração da Sensorização com o Autodesk Tandem	51
4.4.3.	Modelo Final.....	53
4.4.4.	Discussão Geral	53
5.	CONCLUSÕES	55
5.1.	Conclusões Gerais	55
5.2.	Sugestões de Trabalhos Futuros	56
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57

ÍNDICE DE TABELAS / QUADROS

Tabela 1 - Comparação das características dos sensores Sonoff SNZB-02D e SNZB-02P 29

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Perspetiva do edifício obtida no Reality Capture (Fanha, 2023).....	6
Figura 2 - Alçado sul da igreja obtidondo CloudCompare (Fanha, 2023).....	6
Figura 3 - Nuvem de pontos do túmulo de D. Pedro I (Silva, 2019).....	8
Figura 4 - Nuvem de pontos do túmulo de D. Inês (Silva, 2019).....	8
Figura 5 - Dispositivo de mapeamento móvel e aplicação em canteiro de obras. Fonte: Adaptado de Vassena et al. (2023).....	11
Figura 6 - Etapas evolutivas do BIM à implementação do digital twin. Fonte: Deng et al. (2021).....	14
Figura 7 - Distribuição dos estudos sobre digital twin nos campos de pesquisa da indústria AEC. Fonte: Adaptado de Shamma et al. (2022).....	15
Figura 8 - Imagem externa do gêmeo digital do Museu do Ipiranga. Fonte: Museu do Ipiranga (2025).....	16
Figura 9 - Imagem interna do gêmeo digital do Museu do Ipiranga. Fonte: Museu do Ipiranga (2025).....	17
Figura 10 - Simulação de evacuação do prédio. Fonte: Kim (2024).....	18
Figura 11 - Tour virtual. Fonte: Kim (2024).....	19
Figura 12 - Simulação de layout. Fonte: Kim (2024).....	19
Figura 13 - Níveis de classificação do Digital Twin.....	20
Figura 14 - Fluxograma metodológico.....	22
Figura 15 - Vista aérea da ESTGV. Fonte: Google Maps (2025). Acesso em: 2 ago. 2025....	22
Figura 16 - Vista da fachada frontal da edificação.....	23
Figura 17 - Identificação dos ambientes interiores selecionados para o caso de estudo.....	23
Figura 18 - Drone utilizado (DJI Mini 4 Pro).....	24
Figura 19 - Nuvens de pontos segmentadas individualmente no Polycam.....	26
Figura 20 - Vista superior da nuvem de pontos tratada no CloudCompare.....	26
Figura 21 - Sensor Sonoff SNZB-02D.....	29
Figura 22 - Sensor Sonoff SNZB-02P.....	29
Figura 23 - Home Assistant Green.....	30
Figura 24 - Home Assistant SkyConnect.....	30
Figura 25 - Fluxograma da sensorização.....	31
Figura 26 - Visualização dos sensores na tela do Home Assistant.....	32
Figura 27 - Fluxograma do processo de importação dos dados para o Tandem.....	34
Figura 28 - Programação visual no Node-RED.....	35
Figura 29 - Rota de voo no drone.....	37
Figura 30 - Nuvem de pontos no Polycam – Vídeo 1.....	37
Figura 31 - Nuvem de pontos no Polycam - Vídeo 2.....	38
Figura 32 - Nuvem de pontos no Polycam - Vídeo 3.....	38
Figura 33 - Nuvem de pontos no Polycam – Sala de aula 4.....	39
Figura 34 - Nuvem de pontos no Polycam - Sala do Secretariado do DEC.....	39
Figura 35 - Nuvem de pontos no Polycam – Corredor de ligação.....	40
Figura 36 - Utilização do recurso “Align two clouds by picking” no CloudCompare.....	41
Fig. 37 - Ferramenta "Compass" do Cloud Compare. Acima, imagem das arestas escolhidas na nuvem; Abaixo, imagem do edifício real.....	42

Figura 38 - Nuvem de pontos no CloudCompare - Externa (Fachada frontal)	43
Figura 39 - Nuvem de pontos no CloudCompare - Externa (Fachada posterior)	43
Figura 40 - Nuvem de pontos no CloudCompare - Externa (Vista superior)	44
Figura 41 - Nuvem de pontos no CloudCompare - Interna (Vista superior).....	44
Figura 42 - Nuvem corredor sem tratamento	45
Figura 43 - Nuvem corredor com tratamento	45
Figura 44 - Gráfico comparativo no Home Assistant quando os dois sensores estão no mesmo espaço	46
Figura 45 - Gráfico comparativo de temperatura entre salas no Home Assistant.....	46
Figura 46 - Gráfico comparativo de humidade relativa do ar entre salas no Home Assistant.	47
Figura 47 - Fluxograma do tratamento das informações da nuvem de pontos	49
Figura 48 - Vista Superior no CloudCompare	50
Figura 49 - Perspectiva no CloudCompare	50
Figura 50 - Perspectiva da nuvem no Blender	51
Figura 51 - Geometria carregada em uma nova família Revit	51
Figura 52 - Geometria carregada em um projeto Revit.....	51
Figura 53 - Configuração da importação de dados do Home Assistant para o Autodesk Tandem.....	52
Figura 54 - Visualização dos dados dos sensores em tempo real no Autodesk Tandem	52
Figura 55 - Protótipo final no Autodesk Tandem	53

LISTA DE SIGLAS / ABREVIATURAS

AEC – Arquitetura, Engenharia e Construção

AECO – Arquitetura, Engenharia, Construção e Operações

ANAC – Autoridade Nacional da Aviação Civil

ESTGV – Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu

IA – Inteligência Artificial

IoT – *Internet of Things*

IPV – Instituto Politécnico de Viseu

LiDAR – *Light Detection and Ranging*

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

Dentre as diversas modificações no mercado devido ao aprimoramento da tecnologia, principalmente causadas pela quarta revolução industrial, está o surgimento do *digital twin*. Este conceito assenta na integração e ligação entre os ambientes real (físico) e virtual, permitindo, entre outras coisas, simulações de operações e melhorias, acompanhamento de fatores e automatização de tarefas. No contexto da engenharia civil e, designadamente, na manutenção e operação dos edifícios, o *digital twin* pode desempenhar um papel muito relevante, contribuindo de forma decisiva para a otimização do desempenho e das condições de operação das edificações.

O estudo e a aplicação de tecnologias da informação e de ferramentas associadas à digitalização nas diversas áreas da engenharia está diretamente ligada e alinhada com as tendências atuais do mercado. Cada vez mais, busca-se a utilização de modelos interativos que diminuam erros e falhas humanas, muitas vezes associados à implementação de conceitos e técnicas de ciência dos dados e inteligência artificial. Neste contexto, o *digital twin*, especialmente quando associado a sistemas baseados na Internet das Coisas (IoT), apresenta um enorme potencial para a área da engenharia civil. Efetivamente, o sector da construção, que muitas vezes se mostra resistente à mudança, precisa de se manter atento às novas tendências e adaptar-se às tecnologias emergentes disponíveis no mercado.

Neste trabalho é explorado o potencial do *digital twin* para a avaliação e monitorização das condições de conforto térmico dos utilizadores e, conseqüentemente, da eficiência energética dos edifícios. É apresentada uma metodologia para a criação de um *digital twin*, utilizando-se o edifício da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu (ESTGV) como caso de estudo.

1.2 Objetivos do trabalho

Esta dissertação tem por objetivo propor uma metodologia para o apoio à criação de um modelo *digital twin* e explorar o seu potencial para monitorizar as condições ambientais interiores de edificações, utilizando-se o edifício da ESTGV como caso de estudo. Para esse efeito, é necessário cumprir os seguintes objetivos parciais:

- Selecionar ferramentas adequadas para o desenvolvimento do trabalho;

- Desenvolver um modelo de nuvem de pontos do edifício da ESTGV;
- Modelar o edifício através de um software BIM, tirando partido da nuvem de pontos;
- Implementar sensores de temperatura e de humidade relativa nas áreas em estudo;
- Conectar os sensores ao modelo permitindo a monitorização em tempo real das condições ambientais dos espaços interiores;
- Explorar o potencial desta tecnologia tendo em vista a manutenção de condições adequadas de conforto e otimização do consumo de energia, por meio da futura integração do sistema com equipamentos compatíveis com tecnologia IoT.

1.3 Abordagem Metodológica

A abordagem metodológica proposta neste trabalho é de natureza aplicada e experimental e tem como objetivo desenvolver e validar um modelo *digital twin* funcional, baseado na documentação digital e sensorização de um edifício existente. A investigação se insere no contexto da Construção 4.0 como uma tecnologia em grande desenvolvimento aplicada à gestão do ambiente construído.

A fim de alcançar os objetivos específicos foi adotada a seguinte abordagem metodológica:

- Fase I – Captura de Realidade: compreende o levantamento digital do edifício, realizado por meio de técnicas de fotogrametria e LiDAR, e o posterior processamento das nuvens de pontos obtidas. A captura do espaço externo é feita com o apoio de um drone para a captura de vídeo, que é processado e convertido em nuvem de pontos utilizando a plataforma Polycam. Por sua vez, a modelação interior é feita utilizando também plataforma Polycam mas, neste caso, através da tecnologia LiDAR integrada num sensor de um telemóvel. Ambas as nuvens de pontos geradas foram processadas e compatibilizadas utilizando o software CloudCompare.
- Fase II – Sensorização: consiste na instalação de sensores de temperatura e humidade relativa nos espaços em estudo e na sua integração na plataforma Home Assistant, através do protocolo de conectividade Zigbee.
- Fase III – *digital twin*: integra a nuvem de pontos do edifício e os dados sensoriais em um único ambiente virtual, utilizando-se para isso o Autodesk Tandem. A metodologia elaborada para a criação de um modelo digital dinâmico viabiliza a capacidade do modelo refletir as condições físicas do edifício em tempo real.

O carácter interdisciplinar do estudo integra conhecimentos das áreas de engenharia civil, automação e tecnologias da informação, alinhando-se às tendências de modernização do sector AEC.

1.4 Estrutura da dissertação

Este trabalho está organizado em seis capítulos:

- Capítulo 1 – Introdução: Apresenta o enquadramento geral do tema, os objetivos do estudo e a metodologia adotada para o seu desenvolvimento;
- Capítulo 2 – Estado da arte: Realiza uma revisão bibliográfica crítica sobre Fotogrametria e *digital twin*, de modo a contextualizar o estado atual do conhecimento;
- Capítulo 3 – Metodologia: Descreve os equipamentos, softwares e procedimentos empregados na elaboração do modelo *digital twin*;
- Capítulo 4 – Análise de resultados: Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir da aplicação prática da metodologia proposta. Durante a análise são evidenciados os dados encontrados e as decisões tomadas durante o processo experimental;
- Capítulo 5 – Discussão: Aprofunda a interpretação dos resultados, destacando suas implicações e limitações;
- Capítulo 6 – Conclusão: Apresenta as considerações finais e propõe direções para trabalhos futuros.

2. ESTADO DA ARTE

Com o objetivo de obter uma melhor compreensão e enquadramento do tema estudado, foi feita uma revisão de literatura sobre o estado da arte seguindo um conjunto de critérios de seleção de referências, procurando artigos e teses com relevância sobre fotogrametria digital e *digital twin*, preferencialmente em aplicações no sector da construção civil.

2.1. Fotogrametria Digital

2.1.1. Conceito e História

A fotogrametria é a ciência que utiliza a tecnologia para através do registo, medição e interpretação de fotografias obter informações geométricas tridimensionais confiáveis de objetos físicos e do meio ambiente. A fotogrametria é empregada em diversas áreas da engenharia e pode ser usada para várias finalidades como, por exemplo, a documentação ao longo do tempo para registo de património ou cartografia (ISPRS - Sociedade Internacional de Fotogrametria e Detecção Remota, 2022).

O termo fotogrametria provém de muito antes da ciência fotogramétrica complexa como é caracterizada atualmente. Aparece cunhado pela primeira vez em 1893 e é proveniente das palavras gregas *φωτος* (*photos* - luz), *γραμμα* (*gramma* - escrito) e *μετρον* (*metro* - medir), dessa forma, indicando como significado a representação da realidade de medidas obtidas com a luz (Giné, 2018). Quem introduziu o tema na literatura internacional foi Albrecht Meydenbauer, quando utilizou a fotografia para documentar edificações de grande valor arquitetónico na Alemanha (Silva, 2015).

O grande desenvolvimento tecnológico da fotogrametria é marcado pela invenção do computador, datado pelos anos iniciais da II Guerra Mundial. Esse momento é conhecido como o uso da fotogrametria analítica, com avanços principalmente nos níveis de precisão dos resultados obtidos através da aplicação do método. Porém, foi na década de 90 que surgiu um novo momento de viragem, com a fase da utilização da fotogrametria digital. Desde então os avanços têm sido exponenciais e, neste momento, todas as fases do processo são agora passíveis do uso digital, desde a captação, por exemplo, com veículos aéreos não tripulados (drones), até novas capacidades ao nível das técnicas de processamento computacional e maior qualidade de definição das imagens (Fanha, 2023).

2.1.2. Fotogrametria Passiva (imagens) x Fotogrametria Ativa (LIDAR)

Uma forma de classificar a fotogrametria consiste em distinguir em função da tecnologia que é utilizada para o seu desenvolvimento. Nesse sentido, vários autores sugerem uma distinção entre métodos passivo e ativo (Oliveira; Silva; Barros, 2023).

A técnica passiva é habitualmente designada como simplesmente “fotogrametria” e a técnica ativa como “LiDAR”. Sendo assim, a técnica passiva utiliza a sobreposição de imagens fotográficas obtidas em diferentes ângulos e posições para definir a geometria do objeto em estudo. Por outro lado, a técnica ativa, nomeadamente a que utiliza a tecnologia LiDAR, baseia-se na emissão de um laser para medir distâncias em ambientes e/ou objetos, nesse caso, os valores são calculados pelo sistema a partir de uma relação entre o tempo que decorre desde a emissão do feixe de luz (laser) e o retorno da luz refletida ao equipamento (Oliveira; Silva; Barros, 2023).

2.1.3. Utilizações da Fotogrametria

A fotogrametria tem cada vez mais uma vasta gama de utilizações, muito para além das tradicionais como a área cartográfica, com produção e manipulação de mapas e regiões. Atualmente, as aplicações podem se dirigir a diversos campos de atuação, nomeadamente: robótica, navegação, monitorização de qualidade de produto, medicina, análise forense e indústria do entretenimento audiovisual, entre outros (Fanha, 2023).

A fotogrametria tem obviamente muitas aplicações nas diversas áreas da engenharia, destacando-se, no contexto deste trabalho, as seguintes aplicações na área da Engenharia Civil e Arquitetura:

- Área de topografia e levantamento planialtimétrico;
- Apoio na modelação 3D de edificações para documentação do estado atual de conservação dos edifícios (*as built*);
- Integração com modelos BIM para acompanhamento da execução e faseamento de construção;
- Monitorização e controlo de deformações e deslocamentos de encostas, taludes e fundações;
- Inspeção de estruturas e manutenção de obras em locais de difícil acesso como pontes e viadutos, ou fachadas e coberturas de edifícios;

- Planeamento urbano e gestão territorial de áreas urbanas e rurais;
- Registo tridimensional de conjuntos históricos e património arquitetónico.

2.1.4. Utilizações da Fotogrametria na Indústria AEC

2.1.4.1. O Caso do Convento / Escola de Santa Clara de Évora

No que diz respeito ao uso da fotogrametria digital na documentação de patrimónios históricos, há alguns casos que podem ser destacados, entre eles o Convento/Escola de Santa Clara, localizado no centro histórico de Évora, em Portugal (Figura 1 e Figura 2). Este caso de estudo foi desenvolvido e apresentado por Fanha (2023). O trabalho teve como um dos principais objetivos testar a capacidade da tecnologia de processo fotogramétrico como método autónomo para documentação em modelos tridimensionais de edificações em processo de reabilitação.



Figura 1 – Perspetiva do edifício obtida no Reality Capture (Fanha, 2023)



Figura 2 - Alçado sul da igreja obtidondo CloudCompare (Fanha, 2023)

Para a realização da etapa de levantamento, Fanha utilizou diferentes instrumentos para recolha de imagens, dependendo naturalmente das características físicas e geométricas dos espaços analisados que estavam a ser analisados. Para registo da envolvente da edificação, bem como a cobertura, a escolha recaiu na utilização de um drone, tendo-se selecionado um Anafi Parrot, em função do um equilíbrio entre a tecnologia da câmara fotográfica e a acessibilidade financeira para a sua aquisição.

Em relação ao levantamento no interior do edifício e mesmo no exterior, mas ao nível do solo, foi utilizada a câmara fotográfica de um telemóvel Samsung A52s, escolhido pela versatilidade das suas câmaras, que apresentam uma grande resolução e um campo de visão amplo. Ainda para apoio em situações específicas (como em situações em que a fotografia precisava de captar ao mesmo tempo partes internas e externas do edifício), foi utilizada uma câmara fotográfica do modelo Nikon D3200.

Na etapa de processamento fotogramétrico, o autor utilizou o software Reality Capture (RC) como escolha principal para o processamento das imagens. De acordo com o autor, a seleção deste software foi motivada pelas diversas possibilidades de exportação de produtos/modelos e pelo conhecimento prévio do autor na utilização desta ferramenta. Além disso, embora o software seja pago, o custo só é aplicado quando o modelo é considerado satisfatório e se deseja realizar o processamento, o que minimiza eventuais restrições quanto ao uso do ponto de vista financeiro.

Após o processamento dos modelos, também foi utilizado o software CloudCompare (CC), um programa de utilização gratuita que permite uma vasta possibilidade de manipulação da informação, bem como várias opções de visualização e edição tanto da nuvem de pontos, quanto de modelos de superfície texturizada.

Após os levantamentos e o tratamento dos dados, o estudo comprovou a eficácia da fotogrametria digital como método para documentação pormenorizada de quarteirões urbanos. Também se mostrou eficiente na documentação de edifícios à nível arquitetónico, evidenciando o seu potencial de uso em processos de reabilitação. Outro ponto importante destacado pelo autor foi o grau de pormenorização obtido com a tecnologia aplicada, considerado muito elevado e que permite a utilização direta como apoio à execução de projetos.

2.1.4.2. O Caso do Mosteiro de Alcobaça

Para além das técnicas descritas anteriormente para produção de nuvem de pontos, existem outras que também podem ser relevantes para o caso de estudo selecionado para esta dissertação. Um bom exemplo são os tópicos abordados no trabalho “Processamento de nuvens de pontos para estudos do património cultural: caso do Mosteiro de Alcobaça”, desenvolvido por Silva (2019), o qual aborda a utilização de tecnologia de Laser Scanning Terrestre (TLS) e técnicas fotogramétricas de restituição múltipla automática no edifício do Mosteiro de Alcobaça, localizado em Portugal, e classificado como Património Mundial pela UNESCO.

Neste exemplo, as técnicas de fotogrametria foram utilizadas para registar e documentar detalhadamente os túmulos de D. Pedro I e D. Inês de Castro (Figura 3 e Figura 4), localizados no interior da igreja do mosteiro, para os quais foram produzidos modelos tridimensionais e ortomosaicos.



Figura 3 - Nuvem de pontos do túmulo de D. Pedro I (Silva, 2019)



Figura 4 - Nuvem de pontos do túmulo de D. Inês (Silva, 2019)

Para a realização da etapa de levantamento de informações em campo, Silva utilizou uma câmara fotográfica digital Sony Alpha DSLR-A230, para obter fotografias digitais dos túmulos com uma grande área de sobreposição entre si. Esse procedimento garantiu que todas os detalhes fossem registados, totalizando 644 fotografias do túmulo de D. Pedro I e 1387 fotografias no caso do túmulo de D. Inês de Castro.

A segunda etapa da metodologia aplicada à fotogrametria foi o processamento das fotografias obtidas, gerando a primeira nuvem de pontos por meio do software Pix4D, inicialmente com uma quantidade significativa de ruídos. Em seguida, a autora fez a respetiva limpeza da nuvem de pontos, tornando o modelo tridimensional apto para a utilização na próxima etapa.

Por fim, Silva concentrou-se na obtenção de uma malha de triangulação adjacente baseada na nuvem de pontos (*mesh*). Foram utilizadas ferramentas de interpolação que minimizaram a diferença entre os vértices obtidos na nuvem de pontos com os obtidos na *mesh*. Esse procedimento resultou num modelo tridimensional com texturas aplicadas sobre superfícies de alta resolução.

Os modelos tridimensionais obtidos a partir da fotogrametria apresentaram elevada qualidade e rigor dos detalhes dos objetos reais, o que permitiu aos interessados em projetos de reconstituição e reabilitação dos objetos terem um modelo preciso que será muito importante para o apoio e trabalhos futuros.

2.1.5. Benefícios e Limitações da Utilização de Drones

O uso de veículos aéreos não tripulados (VANTs), popularmente conhecidos como drones, é uma das tecnologias mais versáteis para captura de imagens exteriores. Este potencial justificou a escolha deste equipamento para a obtenção de dados fotogramétricos neste trabalho. Entre as vantagens da utilização de drones, destacam-se as citadas por Machado (2021):

- Melhor resolução espacial e temporal em comparação a levantamentos topográficos clássicos;
- Baixo custo de operação, inclusive permitindo a repetição do levantamento sem grandes valores adicionais;
- Capacidade de manter a estabilidade perante ventos moderados;
- Podem ser equipados com uma grande panóplia de sensores como: câmaras fotográficas, sensores térmicos e de infravermelhos, câmaras multiespectrais, sensores Light Detection and Ranging (LiDAR), ou até múltiplos sensores;
- Menos tempo de espera para trabalhar e utilizar os dados.

Por outro lado, Costa *et al.* (2024) indica que a utilização de drones precisa ser previamente ponderada e estudada, uma vez que podem ocorrer algumas dificuldades no uso. Nesse sentido, os autores apontam que deve ser dada especial atenção aos seguintes aspetos:

- Condições climáticas não favoráveis, uma vez que a operabilidade do drone depende da meteorologia, nomeadamente sem chuvas nem ventos fortes;

- Autonomia da bateria eventualmente insuficiente, por isso é necessário ter sempre atenção à autonomia de carga da bateria do drone escolhido e preparar o plano de voo tendo em conta esta condicionante;
- Necessidade de treino do operador do drone, dependendo da região em que se opera, do tipo de drone escolhido e da altura que será operado.

Ainda no que diz respeito às limitações da utilização dos drones, é necessário garantir autorizações regulamentares das entidades responsáveis. De acordo com a ANAC (Autoridade Nacional da Aviação Civil), o uso de drones sofre limitações regulatórias quando o equipamento possui massa igual ou superior a 250 gramas. Nesses casos, torna-se obrigatório o registo do operador na plataforma oficial, exigindo-se ainda a afixação do número de registo na aeronave e a contratação de seguro.

2.1.6. Limitações da Fotogrametria

Apesar dos avanços da tecnologia e de todo o potencial e eficácia já referida da fotogrametria digital na documentação de edificações existentes, existem algumas dificuldades e limitações no seu uso que devem ser referidas. Tais limitações são resultado não apenas dos métodos ou recursos empregados, mas também da própria técnica. Groetelaars (2013) sintetizou estes aspetos da seguinte forma:

- A nuvem de pontos irá documentar apenas objetos que são visíveis nas imagens coletadas; desta forma, para complementar tais informações, muitas vezes é necessário adicionar informações obtidas por outras vias, como medições no local ou observações/deduções;
- Limitação na representação 2D das edificações – é difícil e trabalhoso obter planta baixa de ambientes a partir da fotogrametria, devido principalmente à dimensão dos espaços internos e à presença de elementos que dificultam a leitura (paredes, pilares, etc);
- Dificuldade de conectar ambientes internos e externos na representação geral, sendo necessário recorrer a outras técnicas para sanar esse problema.

É, no entanto, importante referir que estes problemas têm sido objeto de melhorias muito significativas e o aumento da capacidade computacional tem ajudado a mitigar ou mesmo resolver alguns destes pontos.

2.1.7. Tendências Futuras da Fotogrametria

Dentro do sector da construção civil, a fotogrametria é amplamente utilizada e desenvolvida na área de levantamentos topográficos e de edificações existentes. Atualmente tem se consolidado como uma tendência da tecnologia para outras áreas do sector AEC.

Por exemplo, no artigo “Construction Progress Monitoring through the Integration of 4D BIM and SLAM-Based Mapping Devices” (Vassena *et al.*, 2023) os autores utilizaram a tecnologia Lidar integrada em dispositivos móveis como ferramenta para acompanhamento do progresso de obra, conforme mostrado na Figura 5. Também em relação à possibilidade de expansão do uso dessa tecnologia, Borkowski e Kubrat (2024) apresentam um exemplo de aplicação da fotogrametria para inspeção e documentação de edifícios históricos e patrimónios culturais.

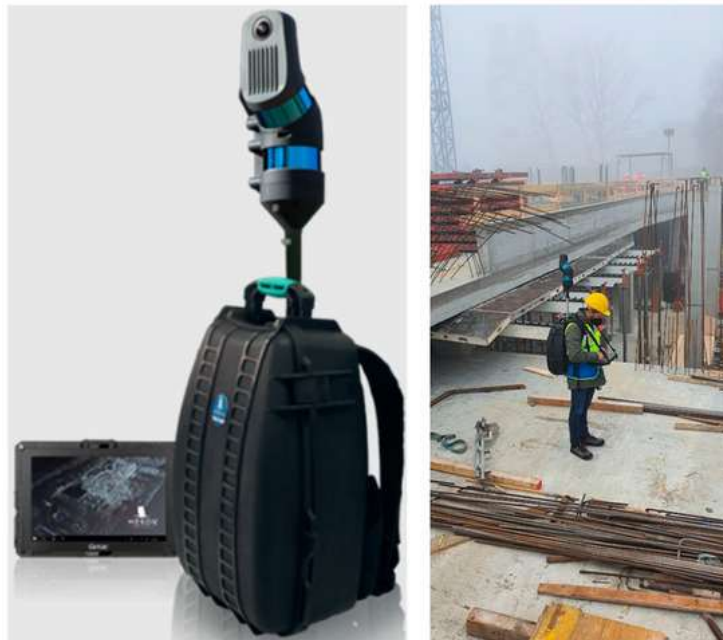


Figura 5 - Dispositivo de mapeamento móvel e aplicação em canteiro de obras.

Fonte: Adaptado de Vassena *et al.* (2023)

Além dos pontos citados, a fotogrametria pode também ser uma forte aliada para a operabilidade e aprimoramento de projetos com vista ao desenvolvimento de um *digital twin*. Brock *et al.* (2021) exploraram a possibilidade de integração da tecnologia LiDAR com o conceito de *digital twin*, utilizando, para isso, a capacidade de motores de jogos para gerar e visualizar ambientes urbanos em tempo real. Através desta abordagem, os autores procuram aprimorar a eficiência e a confiabilidade na precisão do modelo desenvolvido.

2.2. Digital Twin

2.2.1. Conceito e História

O conceito de *digital twin* foi introduzido pela NASA durante o programa Apollo, que decorreu entre as décadas de 1960 e 1970. Rosen et al. (2015) mencionam um primeiro exemplo no qual dois veículos espaciais idênticos foram construídos para permitir o espelhamento das condições da nave durante a missão. Um veículo permaneceu na Terra e foi utilizado tanto para o treinamento dos astronautas em preparação para o voo quanto para simulações durante a missão. Essas simulações buscavam espelhar as condições de voo, auxiliando os astronautas em órbita em eventuais situações críticas.

Apesar do conceito ser antigo, a primeira definição oficial de *digital twin* foi introduzida em 2010 pela NASA: “Um Gémeo Digital é uma simulação multifísica, multiescala e probabilística integrada de um veículo ou sistema construído que utiliza os melhores modelos físicos disponíveis, atualizações de sensores, histórico da frota, etc., para espelhar a vida útil de seu gémeo voador correspondente” (Shafto *et al.*, 2012).

Esta definição remete para a ideia de que o conceito e aplicações iniciais do *digital twin* tinham aplicação e desenvolvimento apenas no sector aeroespacial. Contudo, ao longo dos anos, os estudos da aplicação noutras esferas do conhecimento resultaram em novas definições mais adaptadas para o conceito de *digital twin*, tal como o conceito mais generalista de “uma cópia digital de um ativo físico, recolhendo dados em tempo real do ativo e derivando informações que não são medidas diretamente no hardware” (Fotland; Haskins; Rølvåg, 2020). Esta definição já está mais próxima da ideia de utilização de um *digital twin* no setor da AEC.

2.2.2. Digital Twin x BIM

Em determinados contextos, por vezes verifica-se que o *digital twin* pode ter o conceito confundido com o conceito de BIM. De facto, embora ambos utilizem representações virtuais e tridimensionais de objetos físicos, a definição de cada um deles distingue-se claramente quanto à finalidade e campo de aplicação desses modelos.

BIM “*Building Information Modeling*” é um processo colaborativo que usa modelos digitais inteligentes para criar e gerenciar informações de um empreendimento ao longo de todo o ciclo de vida. É importante referir que BIM não é um software específico e sim uma

metodologia que integra dados de várias disciplinas e que utiliza softwares na sua implementação.

Por outro lado, *digital twin*, como cita Kritzinger (2018), trata de um modelo que propõe um fluxo integrado e contínuo de informação entre o objeto físico e o seu gêmeo digital. Dessa forma, o objeto digital também pode atuar como uma instância controladora do objeto físico e causar mudanças no seu estado. O contrário também é válido, uma vez que qualquer mudança entre objetos é comunicada, podendo ser no sentido digital para o físico ou vice-versa.

Embora distintos, o modelo BIM serviu (e muitas vezes continua a servir) como precursor para a implementação de um *digital twin*. Para Deng et al. (2021), a evolução do BIM pode ser dividida em cinco níveis de desenvolvimento, estando a ligação com o *digital twin* no nível 5, como é possível observar na Figura 6. Os níveis propostos são os seguintes:

- Nível 1: O modelo BIM é utilizado para desenvolvimento e obtenção de informações na fase de projeto, construção e planeamento;
- Nível 2: São incorporadas simulações no modelo BIM e a partir delas obtêm-se resultados com estimativas e previsões;
- Nível 3: O uso de sensores no objeto físico possibilita a visualização e monitoramento do ambiente em tempo real;
- Nível 4: A Inteligência Artificial é integrada ao modelo BIM com o objetivo de possibilitar a tomada de decisão automática a partir das previsões geradas pelo modelo;
- Nível 5: Representa o estágio de maturidade do *digital twin*, quando há controlo, otimização e interação entre o objeto físico e o objeto virtual nos dois sentidos do fluxo de informação.

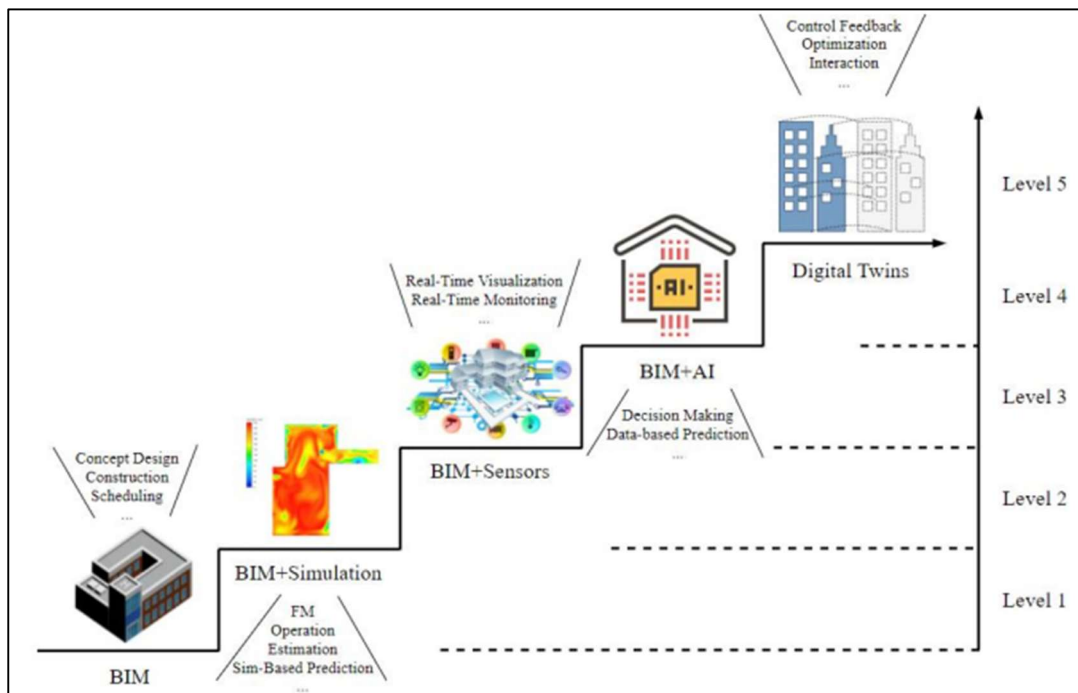


Figura 6 - Etapas evolutivas do BIM à implementação do digital twin. Fonte: Deng et al. (2021)

2.2.3. Utilizações do Digital Twin na Indústria AEC

Numa revisão sistemática sobre *digital twin* e mais especificamente sobre o uso desta tecnologia na indústria AEC, Shamma (2024) destacou que o uso desta tecnologia na construção civil está ainda numa fase inicial de desenvolvimento, principalmente quando comparado com as indústrias aeroespacial e de manufatura onde a sua utilização já se encontra bastante generalizada.

É inegável, porém, os avanços que a Indústria 4.0 promoveu, nomeadamente a partir da integração e compatibilização com a “internet das coisas” (IoT), fontes de informação, monitorização e automação. Essa iniciativa, que dentro do setor da construção civil é denominada Construção 4.0, trouxe conceitos importantes para a transformação de processos e métodos na indústria AEC, destacando-se, entre os avanços, a tecnologia do *digital twin* (Eneyew; Capretz; Bitsuamlak, 2022).

Das diversas áreas da indústria AEC, Shamma et al. (2022) destacam, a partir de uma revisão sistemática sobre o assunto, que 30% dos estudos relativos à tecnologia *digital twin* na área de interesse estão ligadas à fase de operação, nomeadamente na gestão das instalações e equipamentos, como pode ser observado na Figura 7.

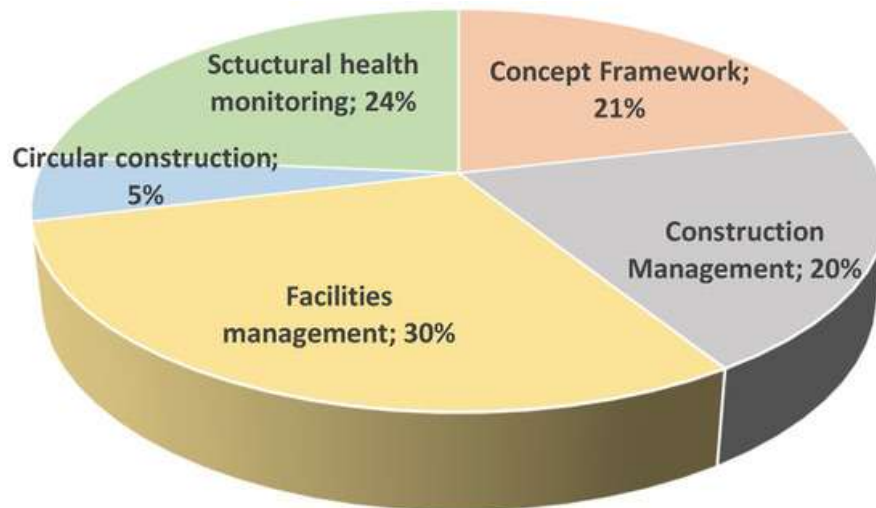


Figura 7 - Distribuição dos estudos sobre digital twin nos campos de pesquisa da indústria AEC. Fonte: Adaptado de Shamma et al. (2022)

De entre as aplicações na fase operacional do edifício, existe ainda a possibilidade de acompanhamento do desempenho estrutural da construção. Nesse contexto, Liguori (2024) desenvolveu uma pesquisa que mostra como essa tecnologia pode ser um diferencial crucial na gestão do acompanhamento de construções civis, com ênfase no contexto estrutural. Por meio da utilização e aplicação de sistemas IoT é possível obter a recolha contínua de dados em tempo real, sendo essas informações fundamentais para garantir a segurança e a durabilidade das estruturas.

Na pesquisa desenvolvida por Liguori (2024), uma série de sensores foram instalados com o objetivo de detetar potenciais assentamentos, vibrações e inclinações na estrutura, causadas pelas obras do metro. Em paralelo, o autor desenvolveu um modelo estrutural do objeto de estudo com o intuito de representar as características esperadas e prever a resposta estrutural frente à influência das obras. Essa abordagem permitiu complementar os dados obtidos dos sensores reais, contribuindo para a viabilização da criação do *digital twin* estrutural.

Outra aplicação do *digital twin* dentro da indústria AEC é na gestão e documentação de património histórico, como o caso do Museu do Ipiranga no Brasil, e em simulações de conforto e segurança de edifícios modernos, como o caso do edifício da Samsung C&T na Coreia do Sul.

2.2.3.1. O Caso do Museu do Ipiranga

O Museu do Ipiranga, localizado em São Paulo - SP (Brasil), faz parte de um complexo arquitetônico denominado Parque da Independência. O edifício foi construído entre os anos de 1885 e 1890 e foi projetado em referência à Proclamação da Independência, datada de 1822. No ano de 1895, o edifício passou a sediar o Museu do Estado, recebendo visitas do público desde então (Museu do Ipiranga, 2025).

Em 2013, o edifício foi fechado ao público devido à necessidade de restauro e reforma. Dentro do contexto de intervenção no edifício, surgiu a necessidade de documentação da obra, a fim de preservar e gerir o património construído, como cita Balzani et al. (2020) em um estudo de caso sobre a documentação 3D do Museu do Ipiranga.

O *digital twin* e a documentação digital integrada trouxeram múltiplos benefícios, desde o apoio técnico ao projeto de restauro, até à gestão a longo prazo e o envolvimento do próprio público no processo. O conteúdo digital desenvolvido e liberado ao público (Figura 8 e Figura 9), nomeado Museu do Ipiranga Virtual, além de ser acessível a todos os usuários, também promove a participação e o diálogo com a população para a conservação desse património histórico.



Figura 8 - Imagem externa do gêmeo digital do Museu do Ipiranga. Fonte: Museu do Ipiranga (2025)



Figura 9 - Imagem interna do gêmeo digital do Museu do Ipiranga. Fonte: Museu do Ipiranga (2025)

As Figuras 8 e 9 mostram o conteúdo digital citado, em que, por meio de uma aplicação gratuita, o público consegue fazer um tour virtual pelo Museu, tanto interno quanto externo. Além de ser possível conhecer a arquitetura do edifício (ver Figura 8), também é possível visualizar exposições disponibilizadas online, como se observa na Figura 9.

2.2.3.2. O caso da Samsung C&T

Dentro do contexto dos edifícios inteligentes, o uso do *digital twin* pode ser um recurso muito útil na procura pela melhoria do desempenho dos edifícios à luz da engenharia moderna. O caso da Samsung C&T, empresa do grupo Samsung, pode ilustrar essa potencialidade e servir de inspiração para outras utilizações.

Implementado no edifício-sede da companhia, o Global Engineering Center, localizado na Coreia do Sul, o *digital twin* que a Samsung C&T desenvolveu cobre uma área total de aproximadamente 100 mil m². O objetivo é utilizar o gêmeo digital para otimizar e operar o edifício, fazendo a gestão de ativos, energia e espaço por meio da aplicação de tecnologia IoT (Kim, 2024).

O modelo desenvolvido é capaz de monitorizar o consumo de energia do edifício em tempo real, desenvolvendo simultaneamente diferentes soluções para a sua gestão, procurando economia e priorizando o conforto dos ocupantes. Essas soluções foram desenvolvidas utilizando recursos de Inteligência Artificial.

Além do recurso energético, o digital twin citado possui ainda as seguintes funcionalidades:

- *Evacuation Simulation* - Recurso que permite simular rotas ideais de evacuação em caso de emergência, além de prever o tempo para desocupar o local, levando em consideração o número de ocupantes em cada andar, permitindo que o edifício conte com um recurso moderno de prevenção contra desastres e de segurança. Esse recurso é ilustrado na Figura 10.
- *Virtual Tour*: Utilizado para promoção do edifício e orientação dentro do espaço, permite que novos funcionários ou visitantes explorem o ambiente virtual em primeira pessoa. A Figura 11 mostra a aplicação desta funcionalidade.
- *Layout Simulation*: Utiliza espaços virtuais para apoio na tomada de decisões e resolução de problemas. Por exemplo a simulação de layout, como se pode observar na Figura 12, que permite configurar um plano de ocupação ideal num espaço por meio do recurso 3D.



Figura 10 - Simulação de evacuação do prédio. Fonte: Kim (2024)

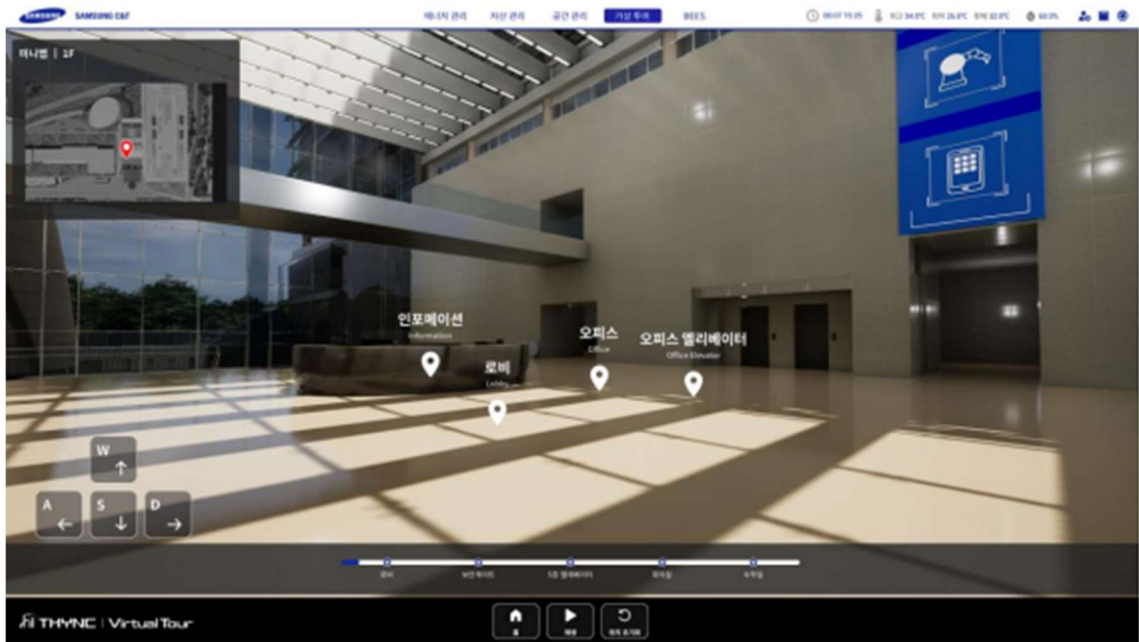


Figura 11 - Tour virtual. Fonte: Kim (2024)



Figura 12 - Simulação de layout. Fonte: Kim (2024)

2.2.4. Classificações do Digital Twin

Para Kritzinger et al. (2018) as fases de criação do *digital twin* podem ser divididas em três níveis, também representados na Figura 13 :

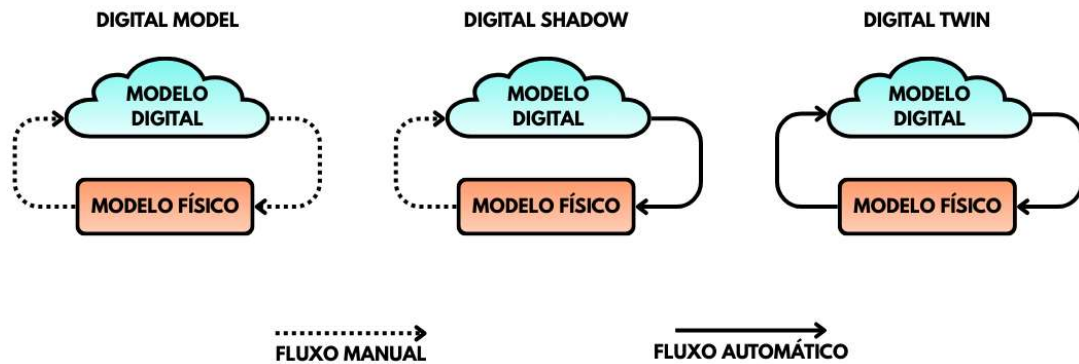


Figura 13 - Níveis de classificação do Digital Twin

- O primeiro nível é definido como “*Digital Model*” e está relacionado com a fase de operação manual de informações, ou seja, nessa etapa o modelo digital e o modelo físico não estão conectados. Sendo assim, para qualquer alteração de características entre eles é necessária uma ação manual de alteração no gêmeo. Nessa etapa não há automação.
- O segundo nível é denominado “*Digital Shadow*”. Nessa fase as informações do ambiente real fluem automaticamente para o ambiente virtual e o sentido contrário ainda ocorre de maneira manual.
- O terceiro nível é nomeado “*digital twin*”, situação em que o fluxo de informações ocorre nos dois sentidos, tanto do modelo físico para o digital, quanto vice-versa.

Conceitos estes que foram coincidentes com os propostos por Lamb (2019), o qual dividiu o conceito de gêmeo digital em dois:

- Modelo digital dinâmico, o chamado “*digital twin*”, que assim como citado por Kritzinger et al. (2018), tanto a componente digital pode receber informações da componente física, como a física pode receber da digital.
- Modelo digital estático ou “*Digital Shadow*”, no qual o fluxo de informação automático ocorre apenas no sentido do modelo físico para o modelo digital.

É importante destacar que para Lamb (2019) “*Digital Shadow*” também é um tipo de *digital twin*, mas foi nomeado de maneira a diferenciar a forma como ocorre o fluxo de informação.

2.2.5. Tendências Futuras do Digital Twin

Com a tendência do mercado de atualização tecnológica permanente, surge a necessidade de implementar métricas de regulamentação e desenvolvimento da tecnologia. Algumas normas relacionadas ao uso de *digital twin* estão sendo implementadas, como por exemplo a ISO 23247: *Automation systems and integration — digital twin framework for manufacturing* (2021).

Estudos preliminares como o de Liguori (2024), a respeito do uso de *digital twin* na monitorização estrutural e as iniciativas para criação de modelos, tanto públicas, como o caso do Museu do Ipiranga, quanto privadas, nomeadamente o *digital twin* desenvolvido pelo Samsung, mostram o potencial do *digital twin* em várias temáticas dentro da indústria AEC.

Os casos apresentados ilustram a transição da engenharia civil para uma nova era da construção, orientada por dados. As experiências apontam de forma clara que o uso combinado de BIM, IA e sensores podem ajudar a reduzir gastos energéticos, prolongar a vida útil dos ativos e criar ambientes mais confortáveis para os usuários.

3. METODOLOGIA

A abordagem metodológica adotada neste trabalho tem como propósito cumprir os objetivos determinados previamente. Para isso, identificou-se um conjunto de tarefas que foram agrupadas em três etapas principais: (1) captura da realidade no interior e exterior do caso de estudo; (2) instalação dos sensores e conexão com o Home Assistant; e (3) integração e processamento de dados no modelo *digital twin*. As diferentes fases estão conectadas entre si, seguindo o fluxograma de processo metodológico apresentado na Figura 14.

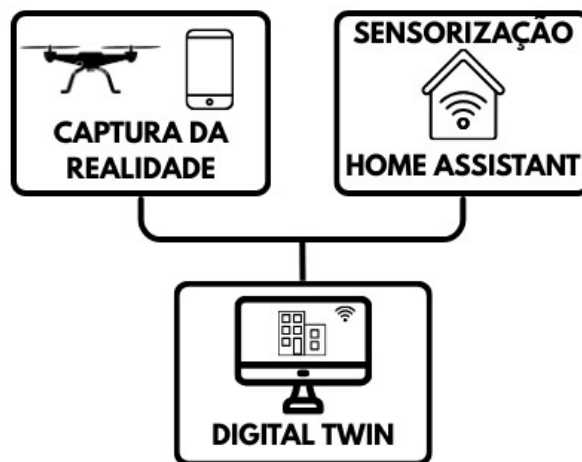


Figura 14 - Fluxograma metodológico

3.1. O Espaço de Interesse

A área escolhida como caso de estudo para este trabalho compreende o edifício do Departamento de Engenharia Civil, na Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu (ESTGV), situado na cidade de Viseu, Portugal. Conforme indicado na Figura 15, o módulo do edifício que é objeto de estudo trata-se da construção situada exatamente ao meio da edificação, a fachada frontal é mostrada na Figura 16.



Figura 15 - Vista aérea da ESTGV. Fonte: Google Maps (2025). Acesso em: 2 ago. 2025.



Figura 16 - Vista da fachada frontal da edificação

Para criação da malha fotogramétrica, o espaço delimitado compreende as fachadas frontal e posterior, bem como a cobertura do edifício. Em relação às salas internas, os espaços escolhidos para a realização das atividades de documentação foram a Sala 4 (sala de aulas) e a Sala do Secretariado (gabinete administrativo), conforme a planta indicada na Figura 17.



Figura 17 - Identificação dos ambientes interiores selecionados para o caso de estudo

3.2. Fase I – Captura de realidade

A documentação fotogramétrica foi dividida em duas etapas: levantamento externo e levantamento interno do edifício. Para o cumprimento dessas tarefas foram utilizados equipamentos específicos, os respectivos softwares apropriados para a geração e tratamento das nuvens de pontos, que se descrevem detalhadamente de seguida. Após a conclusão dos levantamentos, as nuvens de pontos (interna e externa) obtidas foram unificadas de modo a permitir o posterior tratamento e análise das informações em conjunto.

3.2.1. Equipamentos

No registo externo foi utilizado um drone do modelo DJI Mini 4 Pro (Figura 18), para capturar os vídeos que são utilizados como base para as fotografias necessárias para a aplicação da fotogrametria.



Figura 18 - Drone utilizado (DJI Mini 4 Pro)

A escolha foi baseada numa combinação de critérios técnico e operacionais que consideram a praticidade, a segurança e a qualidade das imagens recolhidas, além do acesso ao equipamento que está disponível nos laboratórios do DEC-ESTGV. O equipamento possui peso inferior a 250 gramas, o que o enquadra na Subcategoria A1 conforme a ANAC (Autoridade

Nacional da Aviação Civil), ou seja, não necessita de autorização operacional do órgão, facilitando assim a sua operação. O modelo destaca-se ainda pela qualidade da câmara, capaz de gravar vídeos em 4K a 60 fps, além de contar com sistema de detecção de obstáculos omnidirecional, o que aumenta a segurança durante os voos ao redor da edificação.

Para a realização do levantamento interno, foi utilizado o equipamento iPad Pro, tablet da marca Apple. O dispositivo é equipado com sensor de tecnologia LiDAR (*Light Detection And Ranging*) integrado, uma vez que este sistema permite um levantamento contínuo e com precisão no tratamento dos pontos, identificando ruídos, pontos flutuantes e pontos duplicados. Esta técnica é particularmente eficiente no levantamento de espaços interiores onde o acesso é fácil e a distância aos objetos que se pretendem digitalizar é compatível com o alcance máximo do sensor.

3.2.2. Ferramentas e Softwares

Tendo em conta os objetivos do trabalho que incluem fotogrametria (com recurso ao vídeo captado pelo drone) e digitalização com sensor LiDAR, procurou-se uma ferramenta que fosse capaz de trabalhar com as duas técnicas para a produção de modelos em nuvem de pontos. A escolha da plataforma a utilizar foi assim ponderada de forma que pudesse concentrar a maior quantidade de informações num único meio. Dessa forma, optou-se por trabalhar com a plataforma Polycam, que além da possibilidade de conversão de vídeo em nuvem de pontos, também oferece ferramenta de captura 3D com o uso da ferramenta LiDAR, ideal para a documentação das salas internas do edifício.

Portanto, ao escolher a plataforma Polycam, foi possível reunir toda a documentação interna e externa do edifício na mesma plataforma, ou seja, os diferentes modelos parciais do edifício que foram sendo produzidos (Figura 19). Porém para o tipo de plano contratado, a plataforma apresenta apenas os modelos produzidos individualmente, não sendo possível unificar automaticamente a nuvem de pontos diretamente no aplicativo, sendo, portanto, necessária a escolha de outro software complementar.

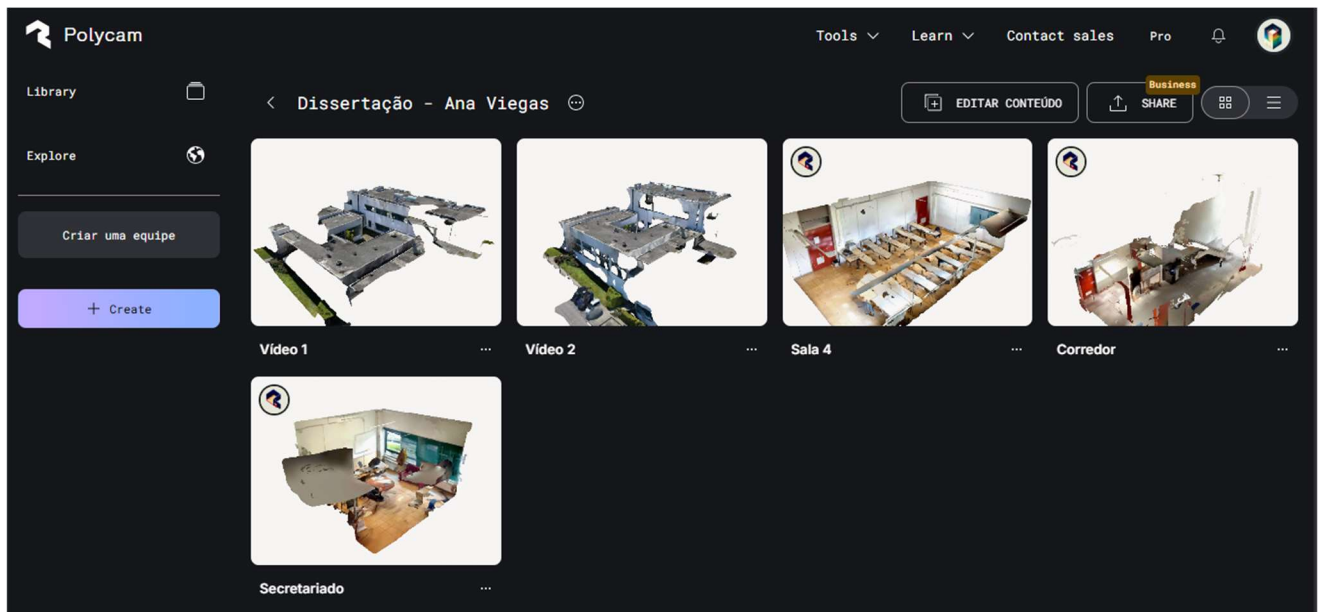


Figura 19 - Nuvens de pontos segmentadas individualmente no Polycam

Para o tratamento e unificação da nuvem de pontos foi utilizado o software CloudCompare. Trata-se de um software livre, de código aberto, no qual é possível tratar e visualizar nuvens de pontos 3D de diferentes formatos, incluindo as que são provenientes da plataforma Polycam (Figura 20).

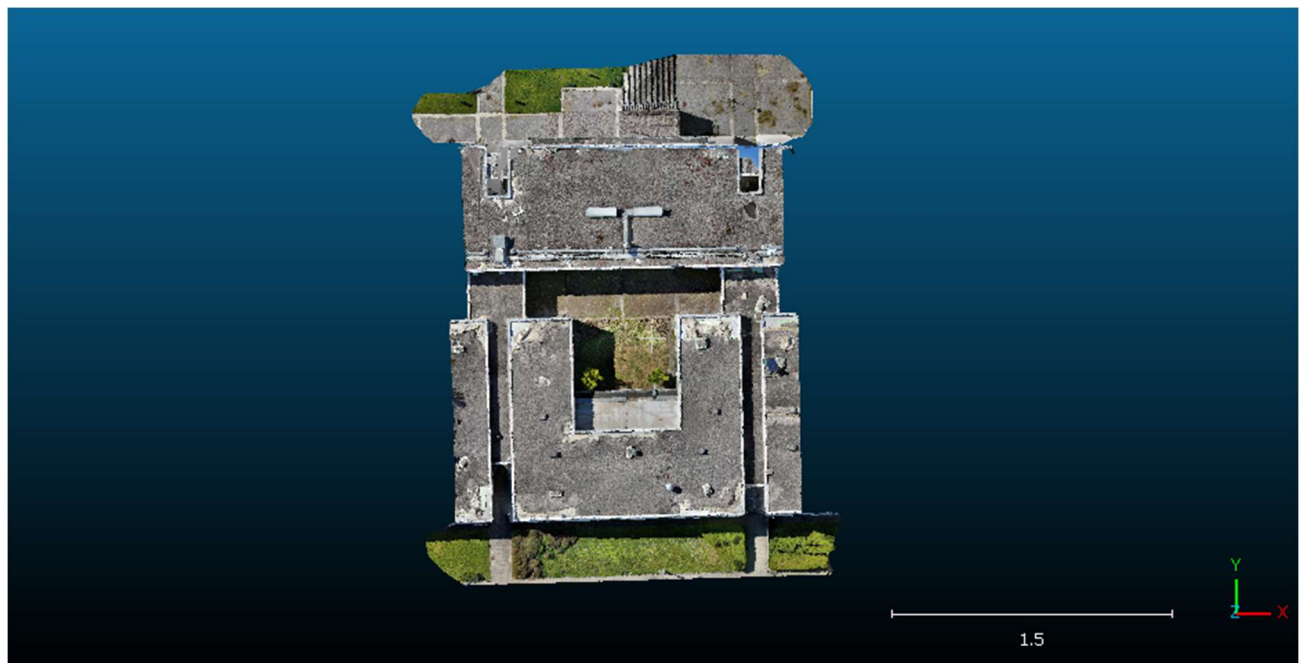


Figura 20 - Vista superior da nuvem de pontos tratada no CloudCompare

3.2.3. Métodos

O planeamento para realizar a documentação foi dividido em dois momentos, o primeiro focado na área externa com a utilização do drone e o segundo para a recolha da informação necessária à digitalização dos espaços interiores.

Em relação ao levantamento no exterior, antes do voo do drone, foi necessário proceder a um planeamento estratégico de toda a operação, nomeadamente a definição da rota de voo. Outra variável importante para a escolha do melhor dia e horário para a recolha do vídeo necessário para a fotogrametria externa é a condição meteorológica, pois o vento e a chuva podem inviabilizar a utilização do drone. Para além da questão do voo, dias nublados podem também interferir diretamente na qualidade das imagens obtidas, pois a baixa luminosidade diminui a definição de texturas e aumenta o ruído nas imagens, condicionando naturalmente a qualidade final da nuvem de pontos que será obtida.

Além da rota definida manualmente durante o voo, o software do drone permite fazer o planeamento prévio baseado na geolocalização, escolhendo a rota conforme o mapa disponível. A vantagem dessa escolha é não ter a interferência humana na rota do voo, que pode gerar um trajeto impreciso devido à utilização do *joystick* do controle remoto. Nesse caso, o operador apenas está atento à possíveis imprevistos. No entanto, a definição prévia de rotas não permite a precisão e detalhe que por vezes são necessários no levantamento de edifícios.

Após a recolha dos dados externos, o vídeo gravado pelo drone foi verificado e de seguida importado na plataforma Polycam que gerou o respetivo modelo em nuvem de pontos.

O levantamento interno iniciou-se com a divisão prévia das áreas de documentação interna de modo a facilitar e agilizar o processo. Esta tarefa foi desenvolvida diretamente na plataforma Polycam. Foi escolhido um horário de menor ocupação do edifício, de modo que o levantamento pudesse ser realizado de forma contínua, sem interrupções pela circulação de pessoas, que poderia comprometer o procedimento de recolha dos dados. Cada sala foi documentada individualmente, de forma a facilitar o processamento na plataforma e o retrabalho, caso fosse necessário.

Com todos os dados de campo disponíveis no Polycam foi possível iniciar o processamento das informações. Para isso foi necessário a exportação das nuvens de pontos do Polycam para o Cloudcompare, tendo para o efeito sido utilizado o formato *.laz*.

O formato de exportação (.laz) é limitado no que diz respeito ao georreferenciamento e, por esse motivo, quando importado no CloudCompare foi necessário compatibilizar os pontos, de forma a alinhar todas as nuvens. O método escolhido foi o recurso *align*, disponibilizado pelo CloudCompare. Esta função requer a identificação pelo utilizador de pelo menos 4 pontos comuns entre as nuvens de pontos para a posterior compatibilização entre elas.

3.3. Fase II – Sensorização

A etapa de sensorização é uma fase fundamental para a implementação do modelo *digital twin*. É nessa fase que se criam as condições para a coleta de dados em tempo real, neste caso, sobre as condições ambientais interiores do edifício, e posteriormente a transmissão dessas informações para o modelo digital. Foram definidos previamente os parâmetros a serem monitorados: temperatura e humidade relativa do ar. Então, a partir dessa definição, foi realizada uma pesquisa detalhada e selecionaram-se os sensores e demais dispositivos necessários para a operacionalização do processo.

3.3.1. Equipamentos

Para a etapa de sensorização foram selecionados quatro equipamentos: dois sensores de temperatura e de humidade relativa do ar, um dispositivo para a automação residencial e um acessório de conectividade entre sensores e dispositivo.

Durante a seleção dos sensores, optou-se por dois dispositivos distintos, Sonoff SNZB-02D (Figura 21) e Sonoff SNZB-02P (Figura 22), para atender aos requisitos do estudo e por apresentarem baixo custo de aquisição e características técnicas de precisão e resolução adequadas à monitorização da qualidade do ambiente interior. A utilização dos dois modelos possibilitou comparar o desempenho de um sensor com display (SNZB-02D), que permite leitura local, e de outro sem display (SNZB-02P), de menor consumo energético e com maior autonomia de bateria.



Figura 21 - Sensor Sonoff SNZB-02D



Figura 22 - Sensor Sonoff SNZB-02P

As características técnicas dos dois sensores fornecidas pelo fabricante estão apresentadas na Tabela 1, verificando-se que a precisão é a mesma.

Tabela 1 - Comparação das características dos sensores Sonoff SNZB-02D e SNZB-02P

Característica	SNZB-02D	SNZB-02P
Visor (display)	Sim	Não
Sensor de alta precisão	Sim	Sim
Medição de temperatura e umidade relativa	Sim	Sim
IGBE 3.0	Sim	Sim
Precisão da medição da temperatura	$\pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$	$\pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$
Precisão da medição da umidade relativa	$\pm 2 \text{ \% RH}$	$\pm 2 \text{ \% RH}$
Taxa de atualização	A cada 5 segundos	A cada 5 segundos
Vida útil da bateria	2 anos	4 anos

A principal vantagem na utilização do sensor SNZB-02D é seu display LCD que possibilita a visualização das informações em tempo real, o que permite comparar a leitura do dispositivo com os dados exibidos na aplicação do Home Assistant, garantido, assim, que as informações entre o sensor e o sistema de automação são iguais e, portanto, todo o sistema está a funcionar conforme o esperado.

Outro ponto importante para a definição do modelo é a conectividade, neste caso foi selecionado o protocolo Zigbee (Zigbee 3.0), escolhido devido à estabilidade e confiabilidade. Esta tecnologia permite a conexão de vários dispositivos simultaneamente, sem interferências de informações e sem sobrecarregar a rede de internet. Além disso, o baixo tempo de resposta

entre dispositivos possibilita que os sensores enviem dados quase em tempo real, característica essencial para as automações e para a integração em modelos de *digital twin*.

O *hub* de automação utilizado foi o Home Assistant Green (Figura 23). O dispositivo destaca-se pela facilidade de uso, dispensando configuração e programação prévias, e pela possibilidade de operação imediata após a conexão à rede de internet. Apresenta ainda um custo de aquisição relativamente reduzido e garante privacidade no tratamento dos dados que estão a ser obtidos.



Figura 23 - Home Assistant Green

Com a escolha dos sensores e respetivo protocolo de comunicação e do Home Assistant Green, foi necessário adquirir um acessório de conectividade entre os dispositivos. Assim, o adaptador USB Home Assistant SkyConnect (Figura 24) foi o selecionado devido à facilidade com que possibilita a conexão com dispositivos via Zigbee (protocolo no qual operam os sensores selecionados).



Figura 24 - Home Assistant SkyConnect

3.3.2. Softwares

O Home Assistant é um software gratuito de código aberto que pode ser acessado através da respetiva aplicação móvel que está disponível para download ou através da interface web. Também é possível habilitar o acesso remoto à plataforma por meio de um serviço de nuvem chamado “Nabu Casa”, que exige um pagamento de uma mensalidade.

Alternativamente ao uso do “Nabu Casa” é possível utilizar o software localmente, nesse caso, os computadores ou dispositivos de acesso ao site do Home Assistant devem estar ligados à mesma rede de internet do Home Assistant Green (esta ligação pode ser efetuada por cabo ou por wi-fi).

3.3.3. Métodos

O fluxograma da Figura 25 busca elucidar de maneira simplificada as etapas da metodologia de implementação dos sensores e do Home Assistant e seus acessórios. Nesse caso, os sensores SNZB-02P e SNZB-02D captam as informações de temperatura e humidade relativa do ar, o Home Assistant SkyConnect funciona como um agente de transmissão da informação dos sensores para o Home Assistant Green e em seguida as informações são transferidas para a plataforma Home Assistant por meio do protocolo Zigbee2MQTT. Cada uma das fases será descrita detalhadamente a seguir.

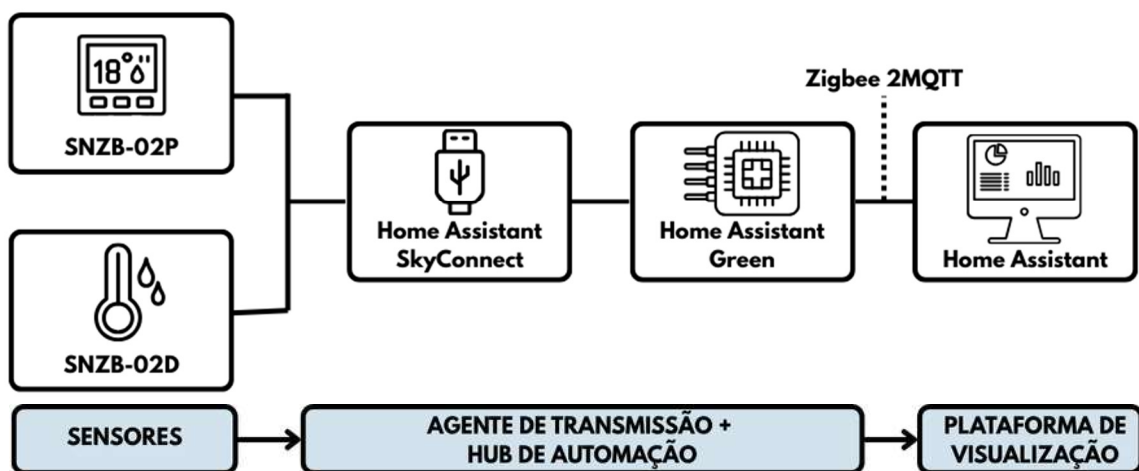
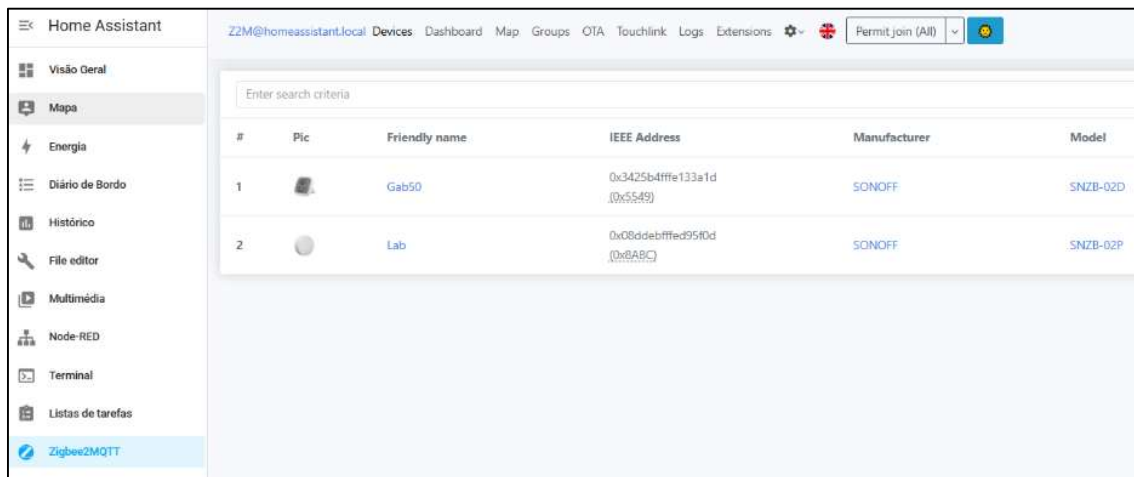


Figura 25 - Fluxograma da sensorização

O primeiro passo para a configuração desse sistema é ligar o Home Assistant Green num cabo de rede de internet da mesma rede que se pretende conectar o dispositivo, ou os dispositivos, de visualização do Home Assistant.

Em seguida, conectou-se o Home Assistant SkyConnect na porta USB do Home Assistant Green, habilitando o dispositivo para receber informações dos sensores através do protocolo Zigbee.

Na última etapa dessa configuração, por meio da interface web do Home Assistant, configura-se a ligação Zigbee2MQTT, que permite a integração dos sensores ao dispositivo de automação. Nesse caso, o Zigbee2MQTT atua como ponte entre os sensores e a plataformas de automação. Este elemento converte os sinais Zigbee para MQTT, um protocolo de mensagens leve muito usado em sistemas baseados em dispositivos IoT.



The screenshot shows the Home Assistant interface with the Zigbee2MQTT integration active. The left sidebar contains various menu items, and the main area displays a table of discovered sensors. The table has columns for ID, PIC, Friendly name, IEEE Address, Manufacturer, and Model.



#	Pic	Friendly name	IEEE Address	Manufacturer	Model
1		Gab50	0x3425b4ffe133a1d (0x5549)	SONOFF	SNZB-02D
2		Lab	0x08ddebffed95d0d (0x8ABC)	SONOFF	SNZB-02P

Figura 26 - Visualização dos sensores na tela do Home Assistant

3.4. Fase III – Digital Twin

A terceira e última etapa do projeto corresponde à implementação do *digital twin* através da compatibilização dos recursos descritos anteriormente. Para o efeito foi selecionado um software específico para criar o modelo virtual capaz de receber informações atualizadas em tempo real do ambiente monitorizado. A execução dessa fase restringiu-se aos meios digitais, sem a necessidade de implementação de novo equipamento, dessa forma, o detalhamento da metodologia foi dividido apenas nos tópicos: softwares e métodos.

3.4.1. Softwares

Dentro dos softwares e plataformas capazes de disponibilizar um sistema de *digital twin* disponíveis no mercado, a escolha recaiu no Autodesk Tandem, essencialmente pelas seguintes razões:

- Licença estudante – o Plano Educacional disponibilizado pela Autodesk oferece acesso gratuito a produtos e serviços para estudantes, incluindo o Autodesk Tandem. Sendo assim, foi possível utilizar todas as funcionalidades do produto gratuitamente;
- Integração com outras ferramentas e softwares da Autodesk, o que facilita a integração de modelos BIM desenvolvidos no Autodesk Revit;
- Os softwares da Autodesk têm grande representação nas empresas de engenharia, portanto, utilizar o Autodesk Tandem aumenta a relevância e a capacidade de disseminação do estudo dentro do mercado AEC;
- Possui bastante material de apoio difundido na internet, com vídeos e manuais produzidos quer pela própria Autodesk, quer pela comunidade de utilizadores.

Por outro lado, o Autodesk Tandem apresenta uma limitação importante, uma vez que não permite a inserção direta de arquivos em formato de nuvem de pontos, motivo pelo qual foi necessário adicionar o uso de mais um software capaz de contornar este impedimento. Durante as pesquisas e tomada de decisão, foram estudadas duas alternativas para a resolução deste problema, ambas utilizando o Autodesk Revit como software de apoio:

- Opção 1: Encontrar uma forma de importação da nuvem de pontos dentro do Revit que fosse capaz de transformá-la num objeto; desta forma o Autodesk Tandem já faria a leitura dessa informação e seria possível a visualização da nuvem de pontos;
- Opção 2: Modelar o edifício a partir da nuvem de pontos, nesse caso, a nuvem de pontos serviria como material de apoio para o desenvolvimento do projeto BIM modelado no Autodesk Revit.

Adicionalmente, recorre-se ao software Blender como ferramenta de apoio ao processamento das nuvens de pontos, de forma complementar ao CloudCompare, com o objetivo de contornar problemas recorrentes associados aos processos de triangulação daquele software.

3.4.2. Métodos

A metodologia selecionada para este trabalho considerou a utilização da “opção 1” citada acima. Desta forma, esta tarefa foi dividida em duas etapas de resolução: importação da nuvem de pontos no Autodesk Tandem e conexão do Home Assistant com o Autodesk Tandem. Para a realização da etapa de importação da nuvem de pontos houve a utilização do software Autodesk Revit e do software Blender como ferramenta de apoio.

As informações contidas no Home Assistant, por sua vez, foram processadas por meio de um código de programação visual para que os dados fossem enviados diretamente e de forma automática para o Autodesk Tandem. Para isso, utilizou-se a ferramenta Node-RED. O fluxograma da Figura 27 mostra o procedimento de trabalho, cujas etapas são detalhadas de seguida.

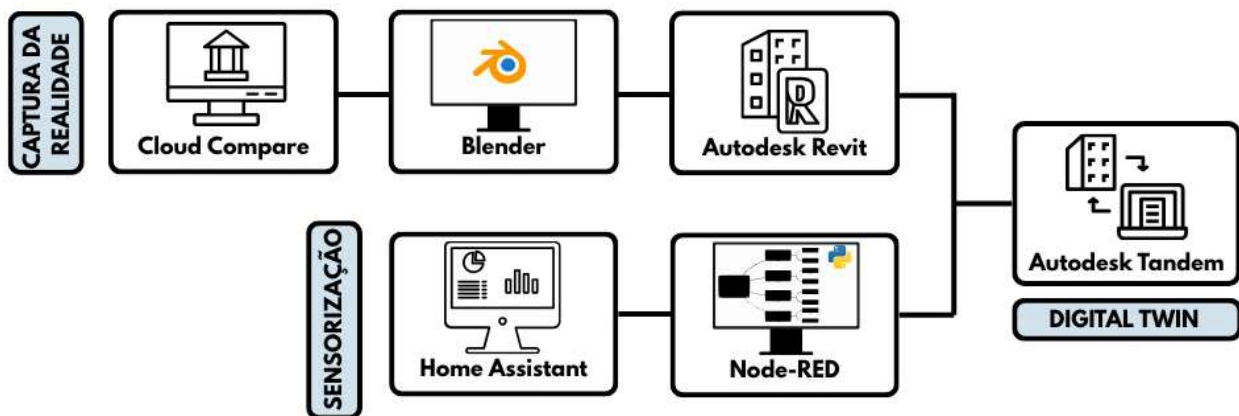


Figura 27 - Fluxograma do processo de importação dos dados para o Tandem

- Conexão entre a nuvem de pontos e o Autodesk Tandem

Conforme o fluxo de trabalho apresentado anteriormente, as primeiras manipulações dos modelos de nuvem de pontos foram feitas no Cloud Compare. Neste programa são determinadas as normais das nuvens de pontos e em seguida gerada uma malha, usando o recurso “Delaunay 2.5 D” (best fitting plane) do próprio software. A malha com texturas gerada pelo software foi exportada como arquivo .obj, extensão de arquivo que é aceite pelo Autodesk Revit.

Em seguida, para fazer a limpeza e a compactação do arquivo, utilizou-se o software Blender como apoio. Este programa recebe arquivos em formato .obj e permite exportar na mesma extensão. Dentre os vários recursos disponíveis no software, utilizou-se o de limpar as

faces excedentes geradas pelo Cloud Compare. Para além deste ponto, o programa faz ainda a compactação do arquivo.

Desta forma, no Autodesk Revit fez-se a importação dos arquivos .obj dentro de uma nova família, com o recurso de “Importar CAD”. Em seguida, importou-se a família dentro de um novo projeto Revit, que será o arquivo .rvt importado no Autodesk Tandem.

- Conexão entre o Home Assistant e o Autodesk Tandem

Para promover a integração entre os dados recebidos a partir dos sensores instalados, e das informações processadas e gerenciadas pelo Home Assistant, para o modelo *digital twin* no Autodesk Tandem, utilizou-se o Node-RED. Trata-se de uma ferramenta open source que permite a criação de fluxos de comandos através de uma programação visual e que permite tornar o fluxo de informação entre os programas autónomo e automático.

Para operacionalizar o processo, foi instalada na Home Assistant a extensão do Node-RED e, por meio do fluxo de programação apresentado na Figura 28, foi definido um vínculo entre os softwares. Esta programação permite que as informações de sensorização sejam devidamente apresentadas e atualizadas em tempo real no modelo *digital twin* que está alojado no Autodesk Tandem. O fluxo desenvolvido permite ainda a gravação dos dados num ficheiro .csv, que pode ser trabalhado e editado por exemplo numa folha de cálculo.

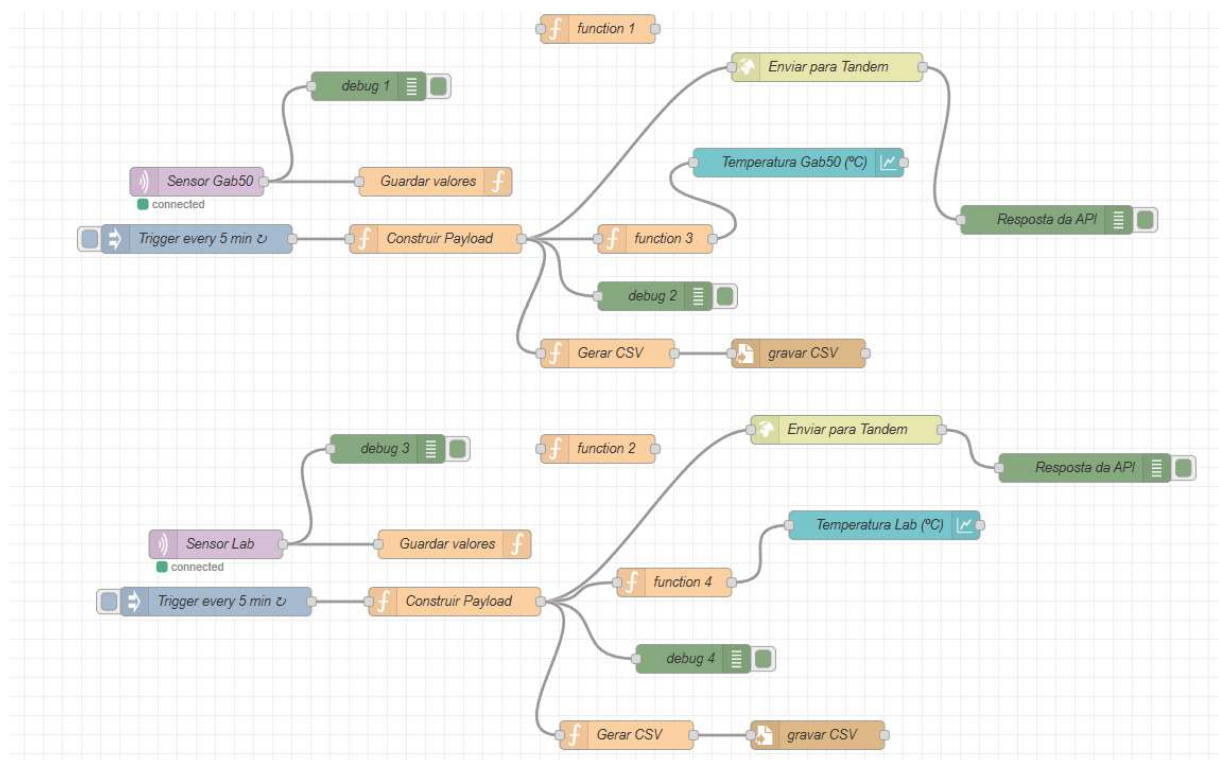


Figura 28 - Programação visual no Node-RED

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1. Considerações Iniciais

O presente capítulo tem como objetivo apresentar e discutir os resultados obtidos, bem como as escolhas realizadas ao longo da pesquisa desenvolvida. A análise foi estruturada de modo a permitir uma compreensão progressiva dos dados que foram sendo obtidos, relacionando cada etapa com as fases metodológicas previamente descritas. A partir dessa avaliação de informações, buscou-se destacar não apenas os resultados técnicos obtidos, mas também os desafios e limitações encontrados durante o processo experimental, contribuindo assim de forma pedagógica para quem está a iniciar trabalhos nesta temática.

Assim como na Metodologia, a análise foi dividida em três fases principais: (I) Captura de realidade, (II) Sensorização e (III) *digital twin*. Cada uma delas representa um conjunto de procedimentos interdependentes que culminaram na consolidação do modelo digital final.

4.2. Fase I – Captura de realidade

Para a análise dos resultados obtidos na fase de captura de realidade, as discussões foram divididas entre as etapas de levantamento externo (fotogrametria) e de levantamento interno. Em cada um dos tópicos, apresentam-se e discutem-se as escolhas que impactaram diretamente no resultado obtido.

4.2.1. Levantamento Externo

A etapa de levantamento fotogramétrico do exterior do edifício ocorreu usando o drone DJI mini 4 pro. Durante a fase de planejamento do voo para o levantamento, foi testada a possibilidade de definição prévia de rota de voo. Esta ferramenta permite que o drone percorra uma rota predefinida, escolhida pelo operador através do recurso de mapa disponível no software de apoio ao drone. Nesse caso, quando a posição é definida a partir da geolocalização do drone, não há necessidade de controle manual do drone, o que diminuiu a imprecisão do percurso, como indicado na Figura 29.

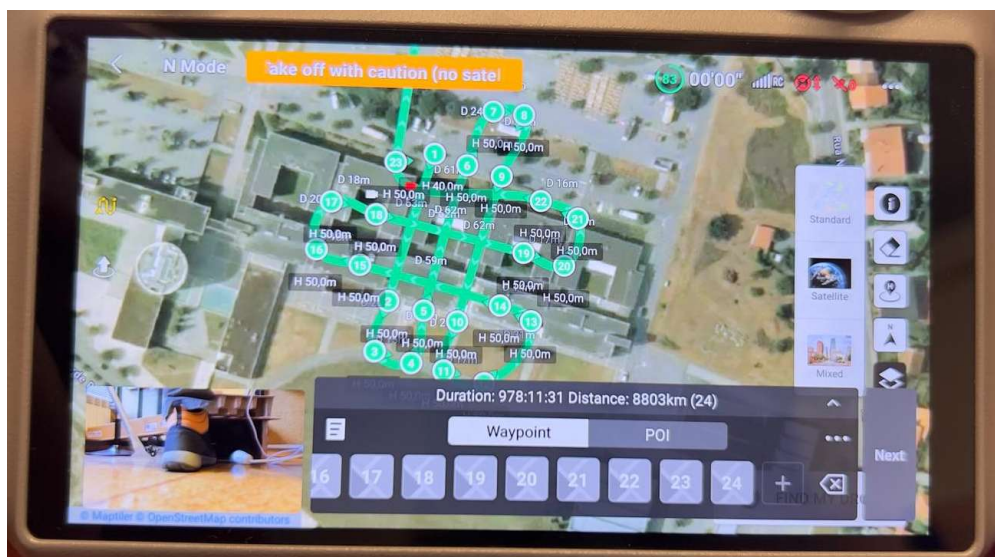


Figura 29 - Rota de voo no drone

Apesar do recurso ser interessante, no caso estudado a área era relativamente pequena em comparação ao máximo zoom disponível no mapa integrado no software do drone. Sendo assim, a escolha dos pontos para a definição do trajeto revelou-se imprecisa, inviabilizando a utilização deste recurso. Portanto, a rota de voo foi feita manualmente durante o voo do drone, utilizando-se o *joystick* do controlo remoto.

O resultado obtido no levantamento externo, foi um conjunto de três vídeos de qualidade 4k, importados posteriormente para o Polycam, para que a plataforma fizesse a conversão de vídeo para modelo de nuvem de pontos. Os dois primeiros vídeos tiveram ênfase na cobertura do edifício, como se pode observar nas Figura 30 e Figura 31. O terceiro foi da fachada frontal do edifício, na qual se pode observar a parede exterior da Sala 4, Figura 32.

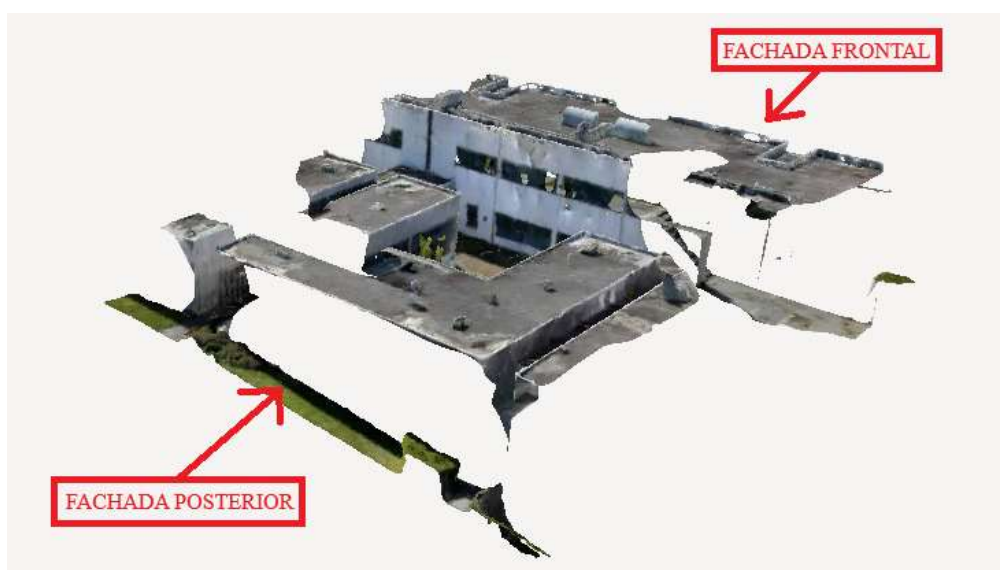


Figura 30 - Nuvem de pontos no Polycam – Vídeo 1

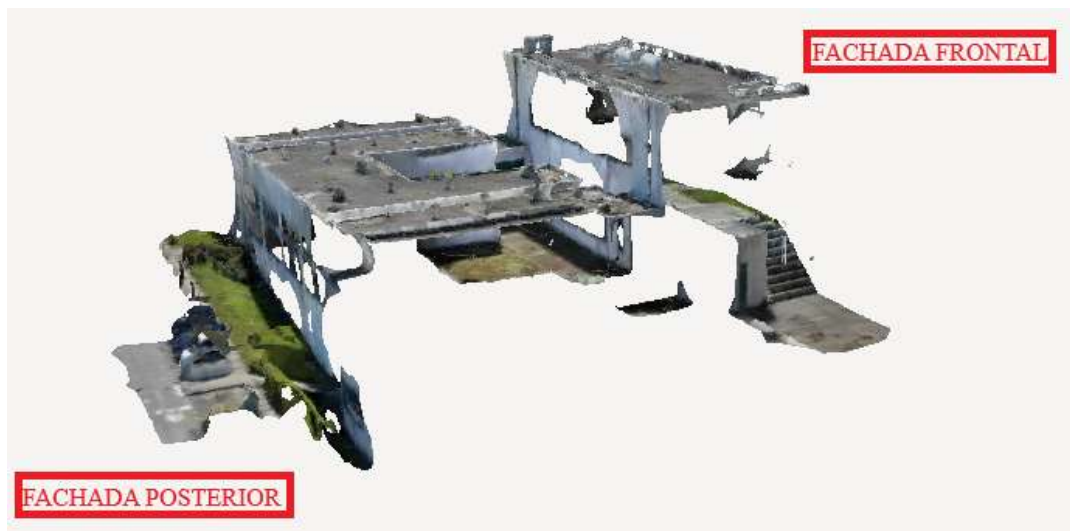


Figura 31 - Nuvem de pontos no Polycam - Vídeo 2



Figura 32 - Nuvem de pontos no Polycam - Vídeo 3

Como é visível pelas imagens anteriores, a nuvem de pontos obtida a partir da transformação do vídeo possuem muitos ruídos e informações que quando unificadas ficaram sobrepostas, por isso, a utilização direta da nuvem gerada pelo Polycam foi inviável e requereu tratamento.

4.2.2. Levantamento Interno

Para o levantamento interno, foi utilizada a tecnologia LiDAR integrada no dispositivo móvel, a fim de capturar com precisão as dimensões e detalhes dos ambientes selecionados. Cada ambiente escolhido foi documentado individualmente, o que facilitou novas medições quando foram necessárias, principalmente no início do processo devido à falta de experiência com a utilização desta técnica. Os resultados obtidos são mostrados nas imagens das Figura 33,

Figura 34 e Figura 35 que correspondem, respetivamente, aos modelos da sala de aula 4, do secretariado do DEC e de uma zona de corredor entre os dois espaços anteriores.



Figura 33 - Nuvem de pontos no Polycam – Sala de aula 4

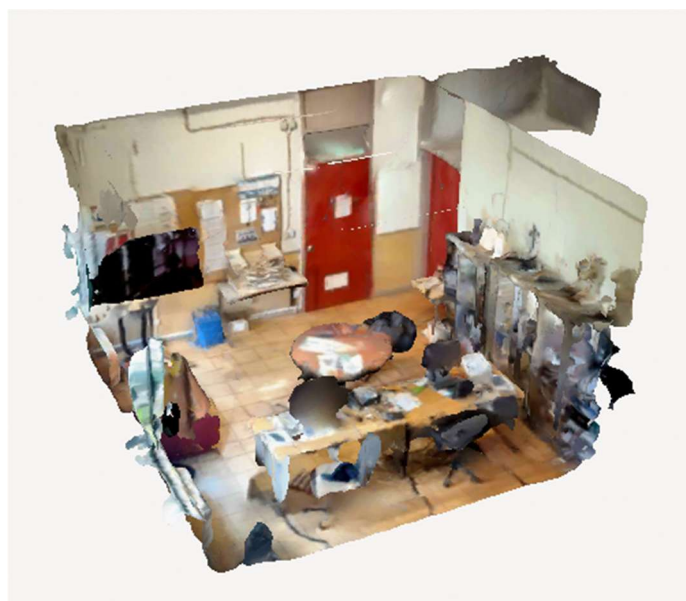


Figura 34 - Nuvem de pontos no Polycam - Sala do Secretariado do DEC



Figura 35 - Nuvem de pontos no Polycam – Corredor de ligação

Os resultados evidenciaram que a qualidade da nuvem de pontos estava diretamente associada à iluminação do ambiente durante o momento em que decorria o processo de digitalização e aos elementos visíveis na cena. Assim, os levantamentos foram realizados preferencialmente com os estores e portas fechados, a fim de controlar a iluminação externa, evitando que o software confundisse pontos de elementos de dentro e fora do ambiente que estava a ser trabalhado.

Apesar destes cuidados, assim como no levantamento externo, no interno também foi possível observar ruídos nos modelos de nuvem de pontos. Entre todos os ambientes, onde houve a maior dificuldade de documentação foi no corredor, uma vez que possui uma grande extensão e altura, apesar de apenas uma parte do ambiente ser verdadeiramente relevante para este estudo. De qualquer forma, o resultado final foi uma nuvem de pontos que apresenta consideravelmente mais falhas e zonas de ruído do que as outras duas.

Destaca-se ainda a diferença na qualidade dos diferentes métodos de documentação digital. Na nuvem de pontos gerada a partir do vídeo em 4k gravado pelo drone, houve menor ruído e melhor definição dos objetos quando comparado com a nuvem de pontos gerada ao utilizar o equipamento com LiDAR. Esta situação pode estar relacionada com a qualidade do sensor LiDAR do equipamento que foi utilizado. Teria sido interessante comparar o resultado obtido utilizando outros equipamentos equipados com este tipo de sensores, mas infelizmente tal não foi possível.

4.2.3. Utilização do Polycam

O aplicativo Polycam foi utilizado quer para o registo e processamento das informações obtidas pelo drone num processo de captura de realidade por fotogrametria, quer através do recurso de digitalização a partir do sensor LiDAR.

Devido ao plano de utilização contratado, não foi possível realizar a unificação direta das nuvens dentro da própria plataforma, originando a necessidade de exportação dos arquivos para tratamento dentro do CloudCompare.

4.2.4. Utilização do CloudCompare

A etapa seguinte consistiu na compatibilização das nuvens de pontos dentro do CloudCompare. Este software é de código aberto e pode ser utilizado para o tratamento e visualização de dados tridimensionais em formato de nuvem de pontos.

Para a unificação das nuvens dentro do mesmo arquivo, foi necessário definir um conjunto de pontos estratégicos que funcionam como referencial para a junção das diferentes nuvens de pontos. Para as nuvens internas, os pontos de referência selecionados foram os cantos das grades de ventilação das portas, devido à sua geometria bem definida e reprodução em todas as salas. Para compatibilizar as nuvens externas com as internas, optou-se pelo uso das arestas das janelas, garantindo o alinhamento preciso entre fachadas e ambientes internos. Para isso, foi utilizado o recurso “Align two clouds by picking”, como exemplificado na Figura 36.

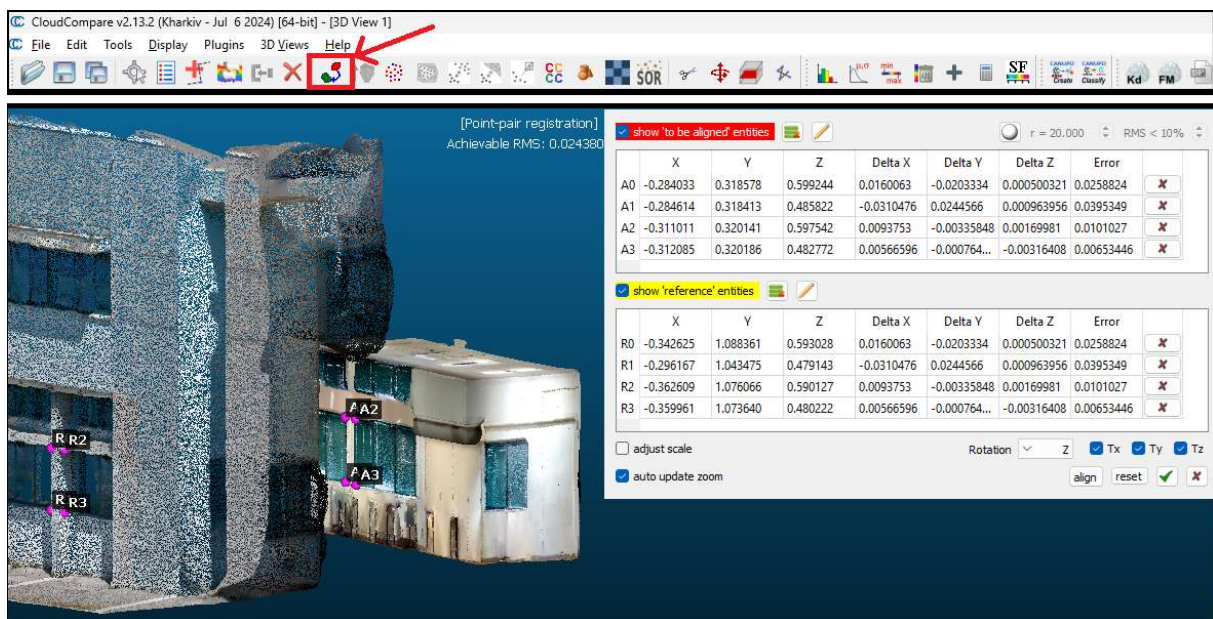


Figura 36 - Utilização do recurso “Align two clouds by picking” no CloudCompare

Após a junção dos diferentes modelos numa única nuvem de pontos, para garantir a confiabilidade dos dados, foi feita a validação das dimensões obtidas, comparando-as com as medidas originais do edifício. Essa etapa foi realizada por meio da ferramenta “Compass” do próprio CloudCompare, que permite medir distâncias e documentar cada medição na estrutura de informações do software. Essa verificação foi essencial para atestar a confiabilidade da documentação digital.

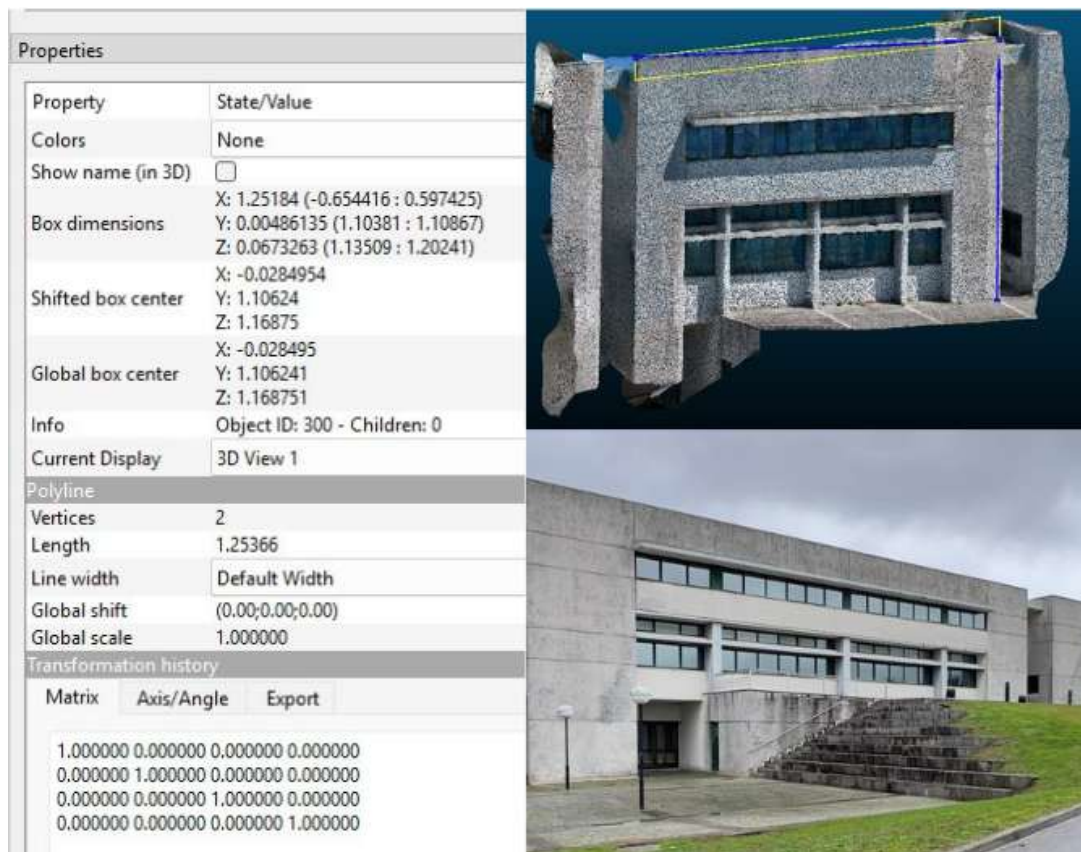


Fig. 37 - Ferramenta "Compass" do Cloud Compare. Acima, imagem das arestas escolhidas na nuvem; Abaixo, imagem do edifício real

Após a conclusão do processo de compatibilização dos diferentes modelos, o resultado obtido foi uma nuvem de pontos consolidada e com dimensões fiéis ao edifício construído. As imagens a seguir mostram a nuvem final obtida como resultado.



Figura 38 - Nuvem de pontos no CloudCompare - Externa (Fachada frontal)



Figura 39 - Nuvem de pontos no CloudCompare - Externa (Fachada posterior)

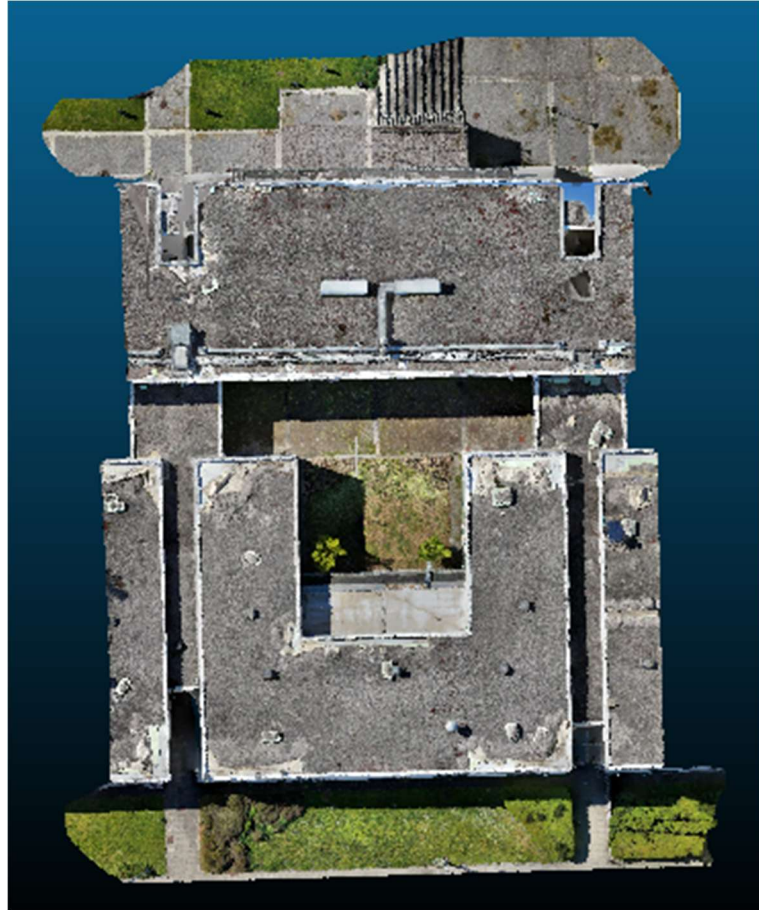


Figura 40 - Nuvem de pontos no CloudCompare - Externa (Vista superior)



Figura 41 - Nuvem de pontos no CloudCompare - Interna (Vista superior)

Além da compatibilização, no CloudCompare também foi possível fazer a limpeza de alguns dos ruídos, ou seja, pontos de dados indesejados que foram capturados durante a digitalização. Nas imagens das Figura 42 e Figura 43 é possível observar a diferença marcante entre uma nuvem gerada a partir da tecnologia LiDAR, sem nenhum tratamento, e uma nuvem na qual houve o tratamento dos ruídos, retirando os pontos que não eram relevantes ou que estavam imprecisos.

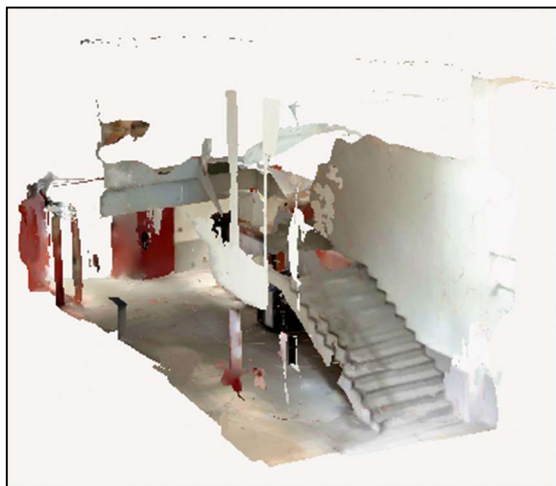


Figura 42 - Nuvem corredor sem tratamento



Figura 43 - Nuvem corredor com tratamento

4.3. Fase II - Sensorização

A segunda fase do estudo consistiu na instalação e configuração dos sensores de temperatura e humidade relativa do ar, bem como na integração desses dispositivos ao sistema de automação doméstica Home Assistant, por meio do protocolo de comunicação Zigbee MQTT. O principal objetivo desta etapa foi viabilizar a coleta de informações do ambiente interior em tempo real e garantir que fossem transmitidas de forma autónoma, contínua e compatível com as fases seguintes de criação do modelo *digital twin*.

4.3.1. Configurações – Sensores

Os dois sensores escolhidos apresentaram um procedimento de sincronização muito intuitivo e eficaz com o sistema Home Assistant. Verificou-se ainda uma grande estabilidade nas leituras, sem variações significativas entre os dados de temperatura e humidade relativa do ar medidos pelos dois modelos de sensores.

Nas imagens seguintes pode-se observar as medições detalhadas durante um período de 4 dias. Esta visualização é obtida diretamente a partir da plataforma Home Assistant. Na Figura 44 observam-se os gráficos com a variação temporal da temperatura e humidade relativa do ar registada pelos dois sensores ao longo dos dias, quando estavam no mesmo espaço, confirmando-se a coerência nas medições. Quando se observa o registo das medições quando sensores os sensores estavam em espaços diferentes verifica-se uma diferença relevante entre os ambientes, que pode ser detalhada nos gráficos apresentados nas Figura 45 e Figura 46.

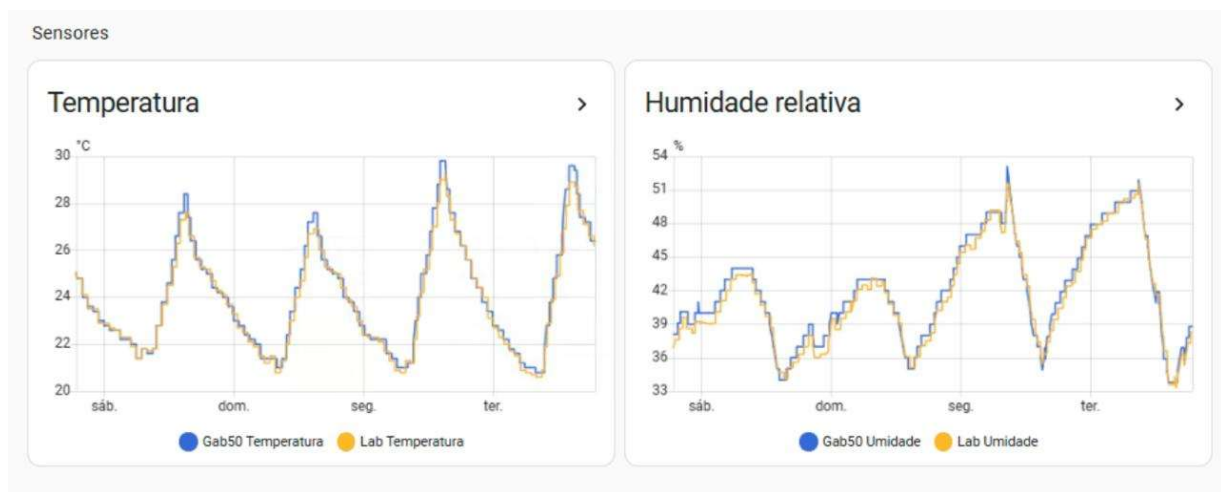


Figura 44 - Gráfico comparativo no Home Assistant quando os dois sensores estão no mesmo espaço



Figura 45 - Gráfico comparativo de temperatura entre salas no Home Assistant



Figura 46 - Gráfico comparativo de humidade relativa do ar entre salas no Home Assistant

Nos gráficos anteriores pode-se observar o potencial da utilização do Home Assistant. Nesse caso, foi possível trabalhar com filtros de horário, dias, área e dispositivo, por exemplo. Apenas a partir da informação gerada e trabalhada no Home Assistant já seria possível analisar algumas tomadas de decisões estratégicas para melhorar as condições ambientais interiores, como por exemplo:

- Ativar a climatização do ambiente em determinados horários quando eficiência temperatura do ar atingir limites de desconforto;
- Acionar elementos de sombreamento para as janelas em situações de sobreaquecimento em simultâneo com exposição solar direta dos vãos envidraçados;
- Aumentar a circulação de ar dentro do ambiente, ou seja, potenciar a ventilação através de abertura de janelas e/ou portas;
- Gerar relatórios de uso e comportamento do ambiente interior, facilitando o acompanhamento técnico, além de viabilizar o cruzamento das informações com variações externas.

4.3.2. Configurações – Home Assistant

As informações recebidas pelo Home Assistant Green só são visíveis no software Home Assistant, disponível para download ou interface web, em dispositivos ligados na mesma rede de internet. Apesar do Home Assistant ser um software gratuito de código aberto, algumas funcionalidades estão disponíveis apenas mediante contratação, como por exemplo o recurso “Nabu Casa”. Este serviço oferece a possibilidade de aceder às informações tratadas pelo Home Assistant em qualquer dispositivo ligado a web, mesmo quando não conectados à mesma rede de internet.

Para esta pesquisa, o recurso do Nabu Casa não foi contratado, recorrendo-se à opção gratuita de visualização. Desta forma, para que seja possível a visualização dos dados é necessário que o computador (ou outro equipamento) com acesso ao software Home Assistant esteja ligado à mesma rede de internet que o Home Assistant Green. Nesse sentido, é importante destacar dois aspetos importantes neste procedimento:

- O Home Assistant Green precisa de estar ligado à internet por um cabo de rede;
- O computador (ou outro dispositivo de visualização) que está ligado ao software Home Assistant precisa de uma ligação à mesma rede de internet, podendo ser via cabo de rede ou wi-fi.

No caso específico do presente estudo, a rede de internet estava disponível via cabo de rede da ESTGV e pertence a uma rede institucional restrita. Essa rede de internet, por questões de segurança, não permite o acesso ao Home Assistant via wi-fi, o que exigiu a utilização de um computador fixo do IPV disponível para acesso à rede por cabo. Essa condição foi um ponto negativo para a elaboração da pesquisa, pois em função dessa limitação, fez-se necessário a implementação do software apenas nesse dispositivo, que ficava fixo à instituição.

4.4. Fase III – Digital Twin

A última fase do estudo consistiu na implementação do modelo *digital twin*, integrando os dados obtidos nas etapas anteriores numa plataforma digital capaz de representar o ambiente real de forma dinâmica. Essa etapa teve como objetivo principal estabelecer a comunicação entre o modelo virtual e as informações resultantes da sensorização que são recolhidas em tempo real.

4.4.1. Integração do Modelo 3D com o Autodesk Tandem

Durante a pesquisa que conduziu à seleção do software a ser utilizado na implementação do *digital twin*, a viabilidade da escolha do Autodesk Tandem deu-se principalmente pela possibilidade de utilizá-lo na modalidade de Licença Estudante e na quantidade de material de apoio disponível na internet. Além disso, durante a utilização do software, percebe-se que ele possui uma interface bastante intuitiva, principalmente para quem já está habituado a trabalhar com softwares da empresa Autodesk. Outros softwares avaliados durante a escolha não possibilitavam a utilização gratuita por estudantes, o que inviabilizou a sua adoção.

Por outro lado, um dos pontos negativos durante o uso do Autodesk Tandem deveu-se ao facto de não ser possível incluir os modelos de nuvem de pontos diretamente na interface do software. Nessas circunstâncias, procuraram-se alternativas para contornar o problema encontrado e, como citado na metodologia, duas opções se mostraram possíveis: encontrar outra forma de importar a nuvem de pontos dentro do Autodesk Tandem através da utilização de softwares auxiliares, ou então modelar a geometria do edifício e das salas estudadas no Autodesk Revit.

Diante dessas alternativas, deu-se preferência para primeira opção, uma vez que a intenção era que o fluxo de informações ocorresse de maneira direta, já que fazer a modelação do edifício seria um trabalho sem propósito para a pesquisa que estava a ser desenvolvida.

O trabalho desenvolvido foi descrito na metodologia e simplificada e pode ser visualizado no fluxograma da Figura 47.

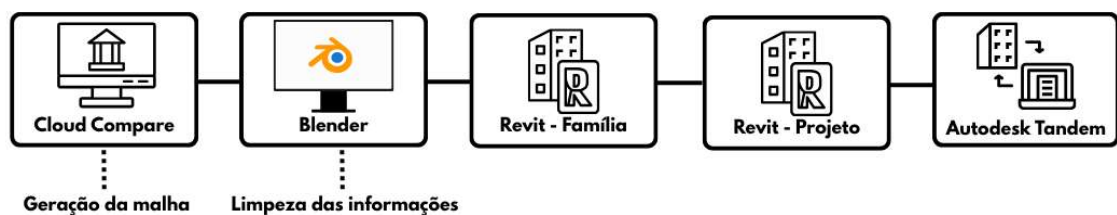


Figura 47 - Fluxograma do tratamento das informações da nuvem de pontos

Durante a execução da etapa de geração da malha dentro do CloudCompare é importante destacar que para cada nuvem foi necessário criar uma malha e exportá-la individualmente. O software permite a união das nuvens antes de gerar a malha, mas para o presente estudo optou-se por manter os seis arquivos separados, para que a execução da atividade dentro do software não sobrecarregasse o computador utilizado, uma vez que essa etapa exige muito tempo e capacidade de processamento.

As malhas foram geradas por triangulação e, a partir de então, todos os pontos gerados pelo Polycam transformaram-se em vértices de uma face, como é possível observar nas Figura 48 e Figura 49.



Figura 48 - Vista Superior no CloudCompare

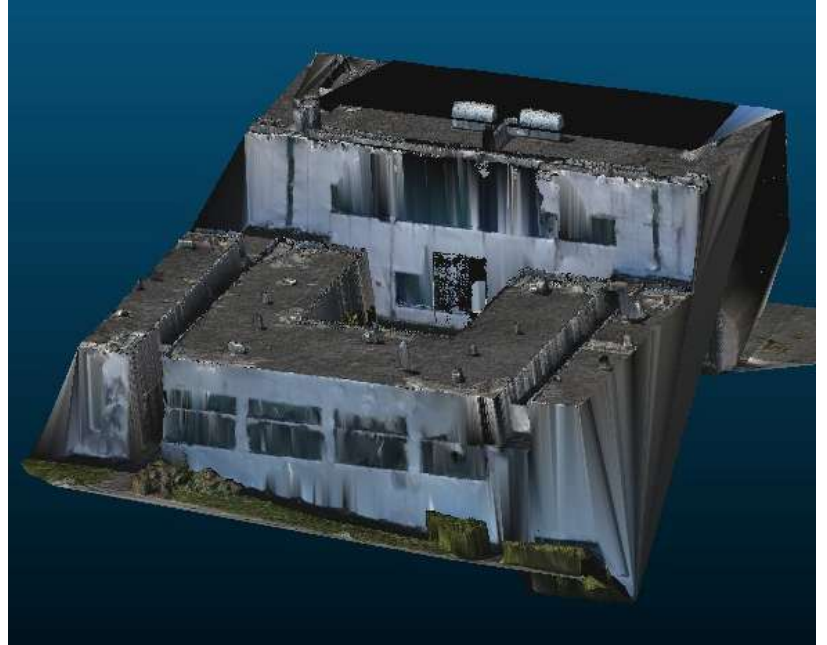


Figura 49 - Perspectiva no CloudCompare

É notório que, principalmente na Figura 49, o recurso utilizado para gerar a malha no CloudCompare deixou o objeto poluído, uma vez que a triangulação da malha buscou fechar todos os pontos coletados. Foi por esse motivo que se viu a necessidade de encontrar um software auxiliar, que permitisse realizar a limpeza das informações indesejadas.

Nesse sentido, foi introduzido o software Blender, utilizado para a limpeza e compactação dos arquivos, eliminando as faces excedentes e unificando as nuvens de pontos. Estes processos permitem ainda reduzir o tamanho final dos modelos, de modo a torná-los mais leves para as próximas importações.

O resultado é a nuvem de pontos apresentada na Figura 50,. Observando-a fica claro que as faces, principalmente as laterais, foram eliminadas. Isso foi importante também para a importação dentro do Autodesk Revit, pois permitiu que o software entendesse a geometria como um elemento não sólido.

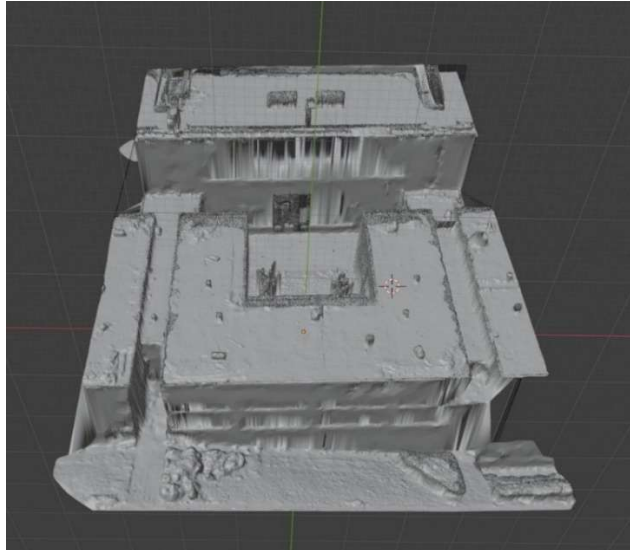


Figura 50 - Perspectiva da nuvem no Blender

Dentro do Autodesk Revit foi necessário criar uma família e projeto para a inserção do arquivo .obj. e em seguida, inseri-lo dentro de um arquivo .rvt. O ponto positivo dessa forma de importação foi o tamanho reduzido do arquivo final, com menos de 1 GB. Por outro lado, o Autodesk Revit não foi capaz de diferenciar as cores, como se observa nas imagens das Figura 51 e Figura 52.

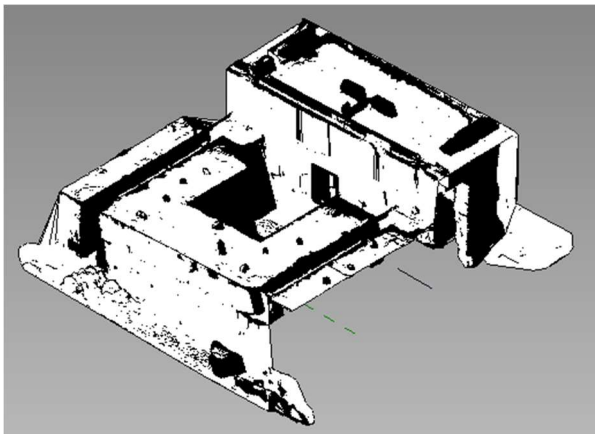


Figura 51 - Geometria carregada em uma nova família Revit

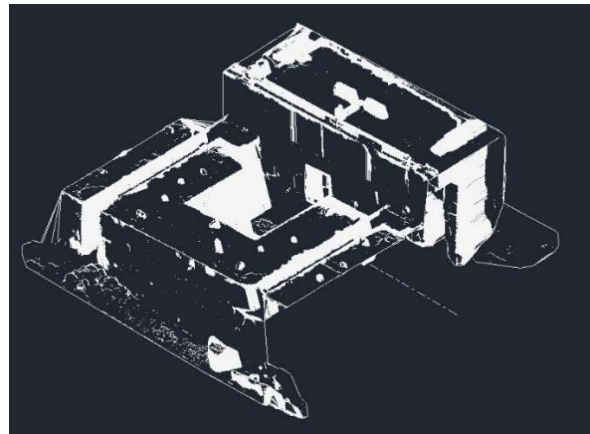


Figura 52 - Geometria carregada em um projeto Revit

4.4.2. Integração da Sensorização com o Autodesk Tandem

Os dados coletados pelos sensores foram recebidos pelo Home Assistant que por sua vez enviou essas informações para o Autodesk Tandem através de um fluxo programado em Node RED. Esta informação é enviada através de mensagens em formato JSON que são lidas

no Autodesk Tandem, como mostra a Figura 53. Os arquivos JSON incluem informação relativa aos registos de data e hora da medição, humidade relativa e temperatura do ar.

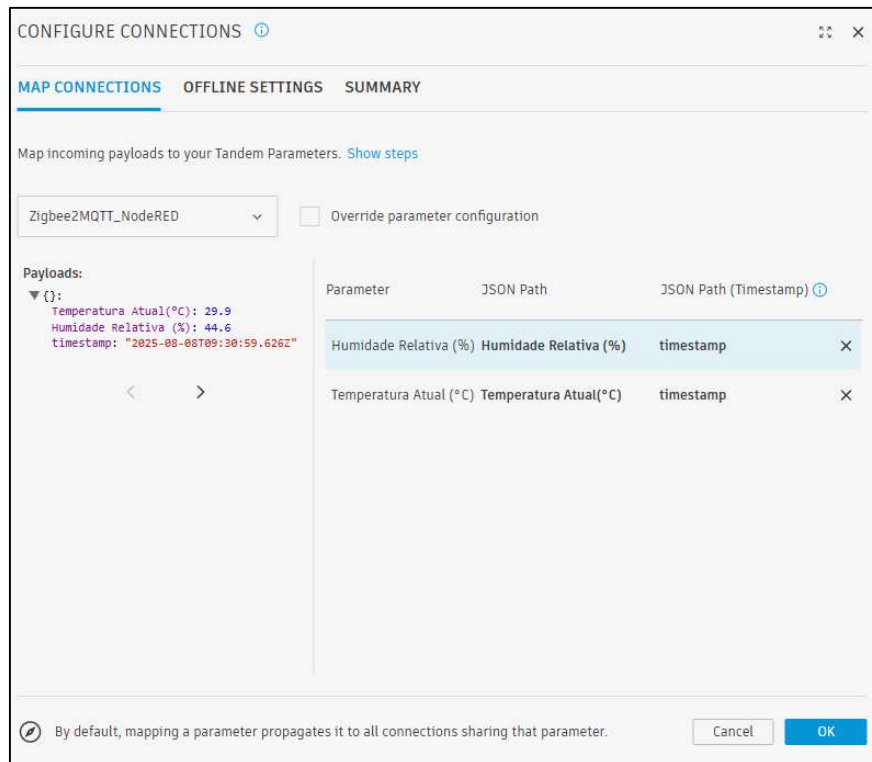


Figura 53 - Configuração da importação de dados do Home Assistant para o Autodesk Tandem

Posteriormente, as informações recebidas foram vinculadas ao objeto 3D que representa o sensor dentro do Tandem. Assim, é possível visualizar os dados em tempo real de maneira intuitiva, como observado na Figura 54.

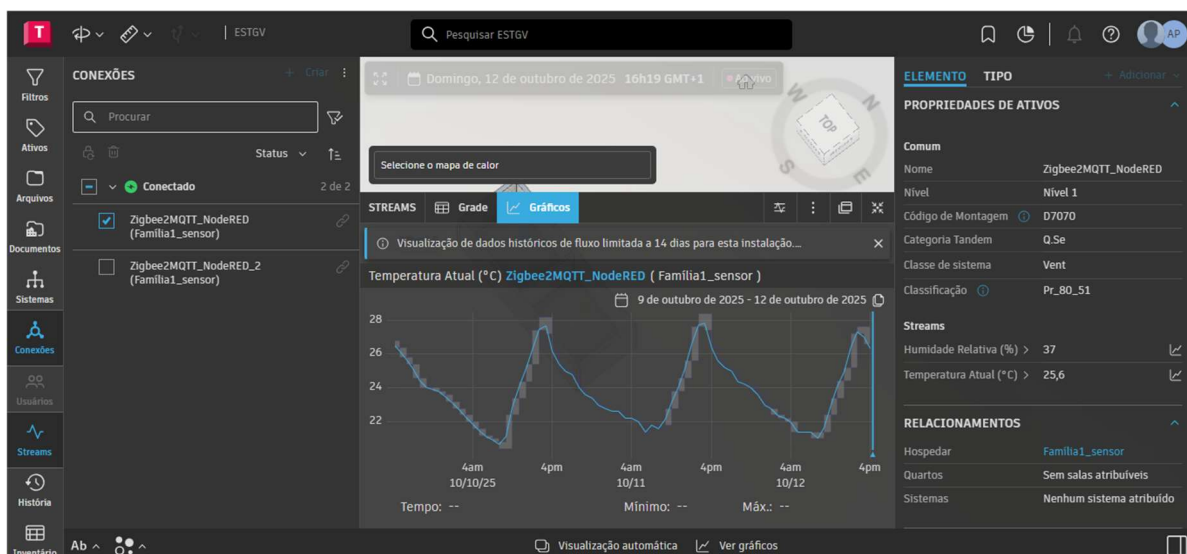


Figura 54 - Visualização dos dados dos sensores em tempo real no Autodesk Tandem

4.4.3. Modelo Final

Com todas as informações vinculadas no modelo *digital twin*, é possível aceder ao gémeo digital online, a partir de qualquer dispositivo ligado à web através de um link de ligação à plataforma do Autodesk Tandem. A visualização final tem o aspeto mostrado na Figura 55.

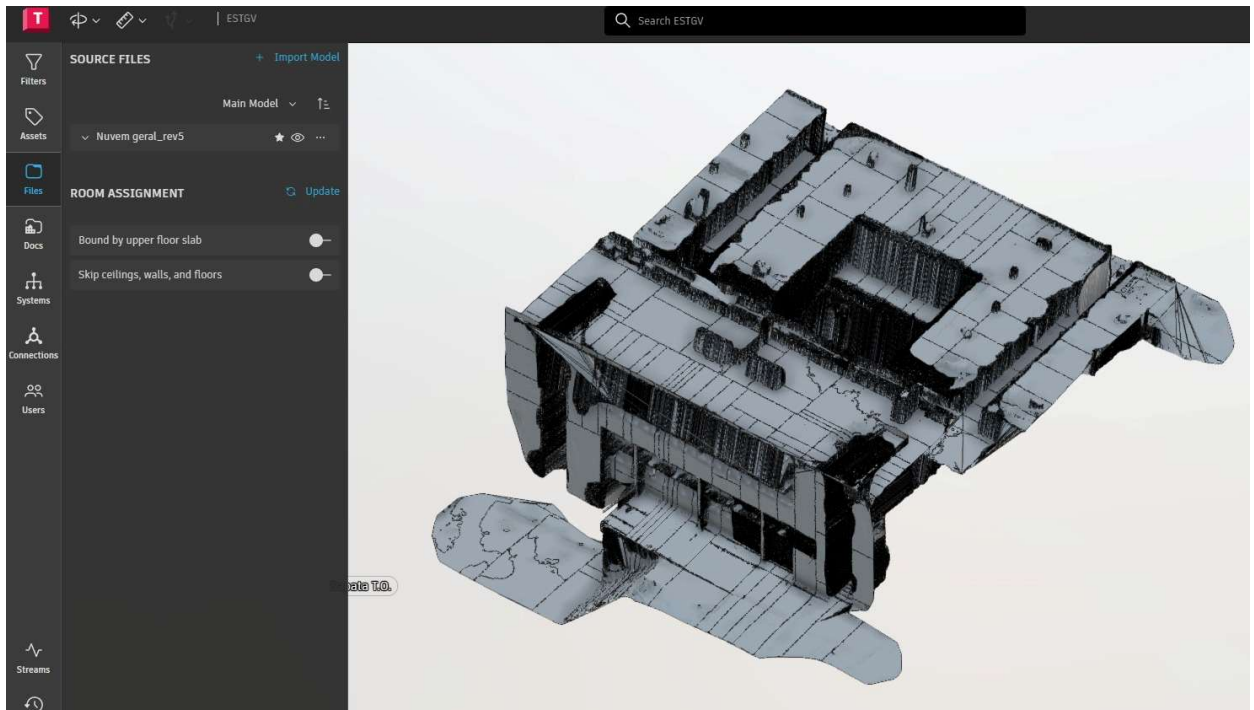


Figura 55 - Protótipo final no Autodesk Tandem

É válido destacar a dificuldade de visualização da posição exata dos sensores no interior do edifício devido à unificação dos elementos, como se percebe na Figura 55. Esta é uma limitação que diminui a satisfação na experiência do usuário e que deve ser mitigada em trabalhos futuros.

4.4.4. Discussão Geral

Ao analisar o modelo desenvolvido neste estudo, observa-se que o protótipo aproximou-se do conceito de *digital shadow*, conforme a classificação proposta por Kritzinger et al. (2018), enquadrando-se, portanto, no segundo nível de desenvolvimento de um *digital twin*. Essa classificação decorre do facto de o sistema ser capaz de receber e processar autónoma e automaticamente, de forma contínua e em tempo real, as informações recolhidas pelos sensores de temperatura e humidade relativa do ar, integrando-as ao modelo virtual criado no Autodesk

Tandem. No entanto, o protótipo não alcançou o nível mais avançado da classificação, em que o modelo virtual também é capaz de enviar informação no sentido contrário e, por exemplo, alterar o ambiente físico por meio de ações automatizadas.

A ausência de dispositivos inteligentes instalados no edifício estudado impediu que o sistema operasse de maneira totalmente bidirecional. Num cenário ideal de *digital twin*, seria possível, por exemplo, que o modelo detectasse automaticamente o aumento da temperatura interna e acionasse um equipamento de climatização conectado, promovendo a regulação térmica do espaço sem necessidade de intervenção humana. No modelo desenvolvido, essa etapa ainda depende da análise e da ação manual do operador, caracterizando-o, portanto, como um *digital shadow* plenamente funcional dentro dos limites estruturais existentes.

De modo geral, essa limitação não representa uma falha do estudo, mas sim um reflexo do contexto real das edificações existentes e da maturidade tecnológica atual no setor da construção civil.

A experiência prática demonstrou que a aplicação de conceitos de *digital twin* em ambientes reais ainda encontra barreiras estruturais, especialmente em edifícios que não foram originalmente concebidos com sistemas de automação ou infraestrutura de Internet das Coisas (IoT). Essa constatação reforça a importância de se compreender o *digital twin* não apenas como uma tecnologia pronta, mas como um processo evolutivo, dependente de camadas de integração gradual entre o físico e o virtual.

O desenvolvimento do protótipo permitiu compreender de forma mais concreta as potencialidades e as limitações da implementação do *digital twin* em edificações reais. O estudo evidenciou que avanços significativos podem ser alcançados mesmo com recursos limitados, desde que haja clareza metodológica, integração entre ferramentas e visão crítica sobre os resultados obtidos. Assim, embora o sistema não tenha atingido o nível mais completo de automação, ele representou um passo relevante na consolidação de um processo de digitalização aplicável a edificações existentes, contribuindo para futuras investigações e aprimoramentos do conceito.

5. CONCLUSÕES

5.1. Conclusões Gerais

Esta dissertação teve como objetivo explorar o potencial de um modelo *digital twin* para monitorar as condições ambientais interiores de edifícios, tendo o edifício do Departamento de Engenharia Civil da ESTGV como caso de estudo. Para tal, foi realizada uma revisão bibliográfica abrangente, abordando conceitos fundamentais e estudos de caso que contribuíram para a fundamentação teórica e metodológica da pesquisa. O tema da Construção 4.0 destaca-se cada vez mais no contexto da transformação digital da indústria AEC, impulsionando o desenvolvimento de tecnologias de visualização, controlo e integração de dados, o que reforça a relevância do trabalho desenvolvido.

Os resultados obtidos demonstraram que o protótipo alcançou os objetivos propostos, comprovando a viabilidade da criação de um modelo capaz de receber e processar automaticamente informações provenientes de sensores de temperatura e humidade relativa do ar em tempo real. Além de cumprir essa função prática, o modelo produzido constituiu uma documentação técnica digital do edifício estudado, servindo como base para futuras pesquisas, manutenções ou intervenções no espaço físico. Assim, o trabalho contribui para o avanço da aplicação do conceito de *digital twin* em edificações existentes, oferecendo um exemplo de integração possível mesmo em contextos com infraestrutura limitada. Os resultados demonstraram também o potencial do modelo para, futuramente, integrar dispositivos compatíveis com tecnologia IoT, o que viabiliza a automatização de ações voltadas à eficiência energética e ao conforto ambiental.

Entre as dificuldades enfrentadas, destacou-se a limitação técnica do Autodesk Tandem quanto à importação de nuvens de pontos, o que impactou a qualidade do modelo tridimensional final. Essa restrição exigiu a criação de etapas adicionais de processamento e resultou em um modelo com menor detalhamento visual, sem distinção de cores ou texturas entre elementos construtivos e com impossibilidade de tratamento individualizado de instâncias como paredes, portas e janelas.

Apesar dessas limitações, o estudo evidenciou que a implementação de modelos digitais pode ser alcançada com recursos acessíveis, desde que se adote uma metodologia estruturada e ferramentas compatíveis entre si. Abrem-se, assim, oportunidades para o aprimoramento de fluxos de trabalho integrados entre BIM, IoT e *digital twin*, bem como para o desenvolvimento de novos estudos que explorem a automação bidirecional e a interoperabilidade entre

plataformas. Desse modo, o trabalho contribui não apenas como aplicação prática, mas também como base de reflexão sobre o estágio atual e os próximos passos da digitalização no setor da construção civil

5.2. Sugestões de Trabalhos Futuros

A partir dos resultados obtidos e das observações no decorrer deste trabalho, sugere-se para trabalhos futuros:

- Investigar alternativas de softwares ou fluxos de trabalho que permitam uma importação mais eficiente e detalhada da nuvem de pontos, de modo a aprimorar a qualidade visual e a segmentação dos elementos no modelo tridimensional;
- Estudar a possibilidade de inserção de dispositivos inteligentes no edifício, a fim de aperfeiçoar o modelo desenvolvido, promovendo o fluxo de informações bidirecionais entre o ambiente físico e o digital;
- Utilizar as informações coletadas pelos sensores ao longo do tempo para discutir e aprimorar o conforto térmico do edifício.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BALZANI, M.; ROSSATO, L.; RACO, F.; MUGAYAR KÜHL, B. *3D city modelling toward conservation and management: the digital documentation of Museu do Ipiranga – USP, São Paulo, Brazil*. In: 5th INTERNATIONAL CONFERENCE ON SMART CITY APPLICATIONS, 2020, Turkey (online). *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, v. XLIV-4/W3, p. 99–106, 2020. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLIV-4-W3-2020-99-2020. Disponível em: <https://www.isprs-archives.copernicus.org/articles/XLIV-4-W3-2020/99/2020/>. Acesso em: 1 out. 2025.

BORKOWSKI, Andrzej Szymon; KUBRAT, Alicja. *Integration of laser scanning, digital photogrammetry and BIM technology: a review and case studies*. *Buildings*, v. 5, n. 4, p. 2395–2409, 2024. DOI: 10.3390/buildings5042395. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-5309/5/4/2395>. Acesso em: 1 out. 2025.

BROCK, Evan et al. *Lidar-based real-time mapping for digital twin development*. In: 2021 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON MULTIMEDIA AND EXPO (ICME), 2021, Shenzhen, China. *Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME)*. Shenzhen, China: IEEE, 2021. p. 1–6. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9428337/>. Acesso em: 5 set. 2025.

COSTA, Rayana Pinto et al. Modelagem 3D de edificação gerada por fotogrametria com uso de veículos aéreos não tripulados (VANT). *Ambiente Construído*, v. 24, p. e131377, 2024. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/T4WNQLHsQZz3Ym93thwtLRG/abstract/?lang=pt#>. Acesso em: 5 set. 2025.

DENG, Min; MENASSA, Carol C.; KAMAT, Vineet R. From BIM to digital twins: a systematic review of the evolution of intelligent building representations in the AEC-FM industry. *Journal of Information Technology in Construction*, v. 26, p. 58–83, 2021. DOI: 10.36680/j.itcon.2021.004. Disponível em: <https://www.itcon.org/2021/4>. Acesso em: 5 set. 2025.

ENEYEW, Dagimawi D.; CAPRETZ, Miriam A. M.; BITSUAMLAK, Girma T. Toward smart-building digital twins: BIM and IoT data integration. *IEEE Access*, v. 10, p. 130487–130506, 2022. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9987476>. Acesso em: 5 set. 2025.

FANHA, Paulo Jorge Ferreira Descalço. *Contributo para uso da fotogrametria digital na documentação e reabilitação de edifícios históricos: o caso do Convento/Escola de Santa Clara de Évora*. 2023. Dissertação (Mestrado em Reabilitação de Edifícios, Ramo Não Estrutural) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2023. Disponível em: <https://estudogeral.uc.pt/handle/10316/115593>. Acesso em: 3 set. 2025.

FOTLAND, Gaute; HASKINS, Cecilia; RØLVÅG, Terje. Trade study to select best alternative for cable and pulley simulation for cranes on offshore vessels. *Systems Engineering*, v. 23, n. 2, p. 177–188, 2020. Disponível em: <https://incose.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/sys.21503>. Acesso em: 5 set. 2025.

GINÉ, Aleix Barberà. Fotogrametria para la conservación-restauración de bienes culturales. *Unicum*, 2018. Disponível em:

https://www.academia.edu/38987034/Fotogrametr%C3%ADa_para_la_conservaci%C3%B3n_restauraci%C3%B3n_de_bienes_culturales. Acesso em: 5 set. 2025.

GROETELAARS, Natalie Johanna. *Um estudo da fotogrametria digital na documentação de formas arquitetônicas e urbanas*. 2013. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/handle/ri/12139>. Acesso em: 4 set. 2025.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 23247-1:2021 — *Automation systems and integration — Digital twin framework for manufacturing — Part 1: Overview and general principles*. Geneva, 2021. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/75066.html>. Acesso em: 4 out. 2025.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING (ISPRS). *ISPRS – Informação a partir de imagens: brochura de apresentação (versão em português)*. 2022. Disponível em: https://www.isprs.org/publications/brochure/ISPRS_brochure_potuguese.pdf. Acesso em: 12 set. 2025.

KIM, Jangsoon. *A paradigm shift in building operations: digital twin with BIM and AI-based data analytics*. 2024. Material de apresentação (Autodesk University). Disponível em: <https://www.autodesk.com/autodesk-university/class/A-Paradigm-Shift-in-Building-Operations-Digital-Twin-with-BIM-and-AI-based-Data-Analytics-2024#handout>. Acesso em: 7 out. 2025.

KRITZINGER, Werner et al. Digital twin in manufacturing: a categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, v. 51, n. 11, p. 1016–1022, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896318314418>. Acesso em: 5 set. 2025.

LAMB, Kirsten. *Principle-based digital twins: a scoping review*. 2019. Disponível em: https://www.cdbb.cam.ac.uk/files/scopingreview_dec20.pdf. Acesso em: 5 set. 2025.

LIGUORI, João Marcelo Cruz. *Desenvolvimento de um digital twin estrutural de uma construção histórica sob monitorização*. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2024. Disponível em: <https://www.proquest.com/openview/32e87ec46ffc03800d9cb633757e59b2/1>. Acesso em: 4 out. 2025.

MACHADO, Tomás Bettencourt de Carvalho. *A utilização de unmanned aerial systems (UAS) para a aplicação de fotogrametria digital e produção de cartografia para homologação*. 2021. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica – Tecnologias e Aplicações) – Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ulisboa.pt/handle/10451/50645>. Acesso em: 3 set. 2025.

OLIVEIRA, Wenderson Igor de Almeida; SILVA, Felipe Wilson Leão da; BARROS, Laerte Melo. *Reconstrução de um projeto comercial com a utilização da tecnologia scanner para BIM*. 2023. Trabalho acadêmico – Instituto Federal do Amazonas, Manaus, 2023. Disponível em: <http://repositorio.ifam.edu.br/jspui/handle/4321/1172>. Acesso em: 4 set. 2025.

ROSEN, Roland et al. About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing. *IFAC-PapersOnLine*, v. 48, n. 3, p. 567–572, 2015. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896315003808>. Acesso em: 5 set. 2025.

SHAFTO, Mike et al. *Modeling, simulation, information technology & processing roadmap: technology area 11*. 2012. Relatório técnico. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/280310295_Modeling_Simulation_Information_Technology_and_Processing_Roadmap. Acesso em: 12 set. 2025.

SHAMMA, Mohamed Nour El-Din Abu. *Blockchain-secured digital twins for promoting energy performance-based contracts in the AECO industry*. 2024. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2024. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/>. Acesso em: 28 jul. 2025.

SHAMMA, Mohamed Nour El-Din Abu et al. Digital twins for construction assets using BIM standard specifications. *Buildings*, v. 12, n. 12, p. 1–22, 2022. DOI: 10.3390/buildings12122063. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-5309/12/12/2063>. Acesso em: 28 jul. 2025.

SILVA, Daniel Carneiro da. Evolução da fotogrametria no Brasil. *Revista Brasileira de Geomática*, v. 3, n. 2, p. 81–96, 2015. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/rbgeo/article/view/5467>. Acesso em: 5 set. 2025.

SILVA, Cláudia Filipa Aguiar da. *Processamento de nuvens de pontos para estudos do património cultural: caso do Mosteiro de Alcobaça*. 2019. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Lisboa, Lisboa, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ulisboa.pt/handle/10451/37719>. Acesso em: 12 set. 2025.

VASSENA, Giorgio P. M. et al. Construction progress monitoring through the integration of 4D BIM and SLAM-based mapping devices. *Buildings*, v. 13, n. 10, p. 1–18, 2023. DOI: 10.3390/buildings13102561. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-5309/13/10/2561>. Acesso em: 12 set. 2025.