

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS**  
**Faculdade de Arquitetura e Urbanismo**  
**Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo**



**Dissertação de Mestrado**

**Scan-to-BIM Sistematizado: Proposta de Processo utilizando sensor  
LiDAR em Dispositivos Móveis para Simulação de Eficiência Energética**

**Natália Dâmaso Bertoldi**

Pelotas, 2025

**Natália Dâmaso Bertoldi**

**Scan-to-BIM Sistematizado: Proposta de Processo utilizando sensor  
LiDAR em Dispositivos Móveis para Simulação de Eficiência Energética**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Pelotas, como requisito à obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo. Área de concentração: Arquitetura e Tecnologia.

Orientador: Antonio César Silveira Baptista da Silva

Coorientadora: Luisa Rodrigues Félix Dalla Vecchia

Pelotas, 2025

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas  
Catalogação da Publicação

B546s Bertoldi, Natália Dâmaso

Scan-to-BIM sistematizado [recurso eletrônico] : proposta de processo utilizando sensor LiDAR em dispositivos móveis para simulação de eficiência energética / Natália Dâmaso Bertoldi ; Antonio César Silveira Baptista da Silva, orientador ; Luisa Rodrigues Félix Dalla Vecchia, coorientadora. — Pelotas, 2025.  
128 f. : il.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, 2025.

1. LiDAR. 2. Levantamento arquitetônico. 3. BIM. 4. Eficiência energética. 5. Simulação computacional. I. Silva, Antonio César Silveira Baptista da, orient. II. Vecchia, Luisa Rodrigues Félix Dalla, coorient. III. Título.

CDD 720

Natália Dâmaso Bertoldi

Scan-to-BIM Sistematizado: Proposta de Processo utilizando sensor LiDAR em Dispositivos Móveis para Simulação de Eficiência Energética

Dissertação aprovada, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Arquitetura e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas.

Data da defesa: 29/08/2025

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Antonio César Silveira Baptista da Silva (Orientador)

Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Luisa Rodrigues Félix Dalla Vecchia (Coorientadora)

Doutora em Arquitetura pela Universidade de Calgary

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Ana Regina Mizrahy Cuperschmid

Doutora em Arquitetura, Tecnologia e Cidade pela Universidade Estadual de Campinas

Prof. Dr. Fábio Kellermann Schramm

Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Anderson Priebe Ferrugem

Doutor em Ciência da Computação pela Universidade Federal de Pelotas

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio e pela concessão da bolsa de estudos, que possibilitou a dedicação necessária para o desenvolvimento desta pesquisa.

Expresso minha gratidão à banca examinadora, pelas contribuições valiosas que enriqueceram este trabalho, e ao meu orientador e à minha coorientadora, não apenas pelo acompanhamento, pela orientação constante e pela confiança depositada em mim, mas também pelo entusiasmo com que conduziram o desenvolvimento da pesquisa, o que me motivou ainda mais a buscar a melhor versão deste trabalho.

Agradeço também à minha família e aos amigos, pelo carinho e incentivo em todos os momentos. Não poderia deixar de agradecer ao Pedro, colega e amigo da Ciência da Computação, cuja contribuição técnica foi indispensável para o desenvolvimento desta pesquisa; e à Helena, colega e parceira em quase todas as disciplinas e orientações, pela presença constante que tornou esta caminhada mais leve e enriquecedora.

Por fim, um agradecimento especial à minha mãe, que, mesmo não sendo da mesma área que eu, sempre foi minha maior referência acadêmica. Esteve ao meu lado em cada etapa, lendo e revisando o texto quantas vezes fossem necessárias e oferecendo apoio incondicional para que esta dissertação se tornasse possível.

## Resumo

BERTOLDI, Natália Dâmaso. **Scan-to-BIM Automatizado: Proposta de Processo utilizando sensor LiDAR em Dispositivos Móveis para Simulação de Eficiência Energética**. Orientador: Antonio Cesar Silveira Baptista da Silva. 2025. 128 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, 2025.

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a avaliação de um método automatizado para o levantamento e modelagem de edificações existentes utilizando a tecnologia LiDAR (*Light Detection and Ranging*) presente em dispositivos móveis, com integração à plataforma BIM (*Building Information Modeling*) por meio do Dynamo, programação visual associada ao software *Autodesk Revit*. A proposta surge da necessidade de otimizar o processo de geração de modelos digitais voltados à etiquetagem de eficiência energética por simulação, utilizando o recurso *System Analysis* do *Autodesk Revit*. O processo proposto emprega o aplicativo pCon.scan para capturar a geometria dos ambientes e gerar arquivos estruturados (.eox), que são interpretados por um script em *Python* inserido no *Dynamo*, automatizando a criação de ambientes internos. A abordagem metodológica baseia-se no *Design Science Research* (DSR), que visa solucionar problemas práticos por meio da criação de artefatos — neste caso, um fluxo automatizado de levantamento e modelagem. Os resultados obtidos demonstram que o método é significativamente mais rápido do que o levantamento convencional. O método mostra-se promissor para aplicações que demandem rapidez em levantamentos iniciais, como reformas, regularização de edificações ou análise energética, desde que não necessitem de informações muito detalhadas. Ainda que apresente limitações, os ganhos de tempo e a integração direta com processos de simulação energética evidenciam seu potencial de transformação no cenário de modelagem de edificações existentes.

**Palavras-chave:** LiDAR; Levantamento arquitetônico; BIM; Eficiência Energética; Simulação Computacional.

## **Abstract**

BERTOLDI, Natália Dâmaso. **Automated Scan-to-BIM: Proposed Process Using LiDAR Sensor in Mobile Devices for Energy Efficiency Simulation.**

Orientador: Antonio Cesar Silveira Baptista da Silva. 2025. 128 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, 2025.

This work presents the development and evaluation of an automated method for surveying and modeling existing buildings using LiDAR (Light Detection and Ranging) technology available in mobile devices, integrated with the BIM (Building Information Modeling) platform through Dynamo, a visual programming tool associated with Autodesk Revit. The proposal arises from the need to optimize the generation of digital models aimed at energy efficiency labeling by simulation, using the System Analysis feature of Autodesk Revit. The proposed process employs the pCon.scan application to capture room geometry and generate structured files (.eox), which are interpreted by a Python script embedded in Dynamo, automating the creation of indoor environments. The methodological approach is based on Design Science Research (DSR), which seeks to solve practical problems through the creation of artifacts — in this case, an automated workflow for surveying and modeling. The results demonstrate that the method is significantly faster than conventional surveying. The method proves promising for applications requiring speed in preliminary surveys, such as renovations, building regularization, or energy analysis, provided that highly detailed information is not required. Although it presents limitations, the time savings and direct integration with energy simulation processes highlight its potential to transform the field of existing building modeling.

**Keywords:** LiDAR; Architectural Surveying; BIM; Energy Efficiency; Computational Simulation.

## Lista de Figuras

Figura 1: iPhone com o sensor LiDAR emitindo uma matriz de $8 \times 8$ pontos difratados em grades de $3 \times 3$ (a), sensor no iPhone 12 Pro (b), modelo 3D de um objeto com dimensões (c), aplicativo digitalizando um ambiente externo (d). .....	23
Figura 2: Esquema de execução do escaneamento: movimento que o dispositivo móvel deve realizar, iniciando da parte inferior para a superior (a) movimento horizontal de quem estiver realizando o escaneamento (b). ....	23
Figura 3: Comparação entre o Scanner a Laser Terrestre (TLS), a Fotogrametria (DSLR) e o LiDAR do iPad Pro (SSL). ....	25
Figura 4: Comparação do levantamento TLS com o levantamento LiDAR. ....	25
Figura 5: Comparação da nuvem de pontos gerada pelo TLS, 3D Scanner App, SiteScape e EveryPoint. ....	29
Figura 6: Scan-to-BIM e Scan-vs-BIM. ....	34
Figura 7: Fluxograma do sistema proposto pelos autores. ....	35
Figura 8: Método para reconstrução de fachada usando dados coletados por Laser Scanner. ....	36
Figura 9: Passos para conduzir a pesquisa tecnológica. ....	45
Figura 10: Delineamento da pesquisa e etapas metodológicas. ....	46
Figura 11: Etapas envolvidas no processo. ....	49
Figura 12: Objeto de estudo exploratório. ....	51
Figura 13: Fluxograma com as alternativas de processo desde o levantamento até o modelo pronto para a simulação dentro do <i>software Autodesk Revit</i> . ....	53
Figura 14: Sala utilizada para os testes comparativos do processo proposto com o processo convencional. ....	57
Figura 15: Etapas para análise do estudo de caso. ....	59
Figura 16: Modo LiDAR (A). Modo <i>Room</i> (B). ....	63
Figura 17: Interface de visualização do escaneamento com <i>RoomPlan</i> . ....	65
Figura 18: Tela do aplicativo <i>Polycam</i> durante o escaneamento com <i>RoomPlan</i> . .....	66
Figura 19: Recomendações para bons resultados dos escaneamentos pelos aplicativos. ....	67



Figura 20: Importação no <i>Revit</i> dos arquivos <i>USDZ</i> do <i>Magiscan</i> convertidos em <i>DWG</i> ou <i>SKP</i> . .....	70
Figura 21: <i>SKP</i> (A) e <i>DWG</i> (B) gerados a partir do <i>EOX</i> do <i>pCon.Scan</i> e importados no <i>Revit</i> . .....	71
Figura 22: <i>SKP</i> (A) e <i>DWG</i> (B) gerados a partir do <i>GLTF</i> do <i>Polycam</i> e importados no <i>Revit</i> . .....	71
Figura 23: <i>SKP</i> gerado a partir do <i>USDZ</i> do <i>MagicPlan</i> e importado no <i>Revit</i> . .....	72
Figura 24: Modelo <i>IFC</i> vinculado no <i>Revit</i> . .....	74
Figura 25: Modelo no <i>Sketchup</i> com as classificações dos elementos no formato <i>IFC</i> . .....	75
Figura 26: <i>PortalIFC</i> (A), <i>JanelaIFC</i> (B) e <i>ParedelIFC</i> (C) selecionados no <i>Revit</i> . .....	76
Figura 27: Programação visual em <i>Dynamo</i> para converter representações de <i>scan 3D</i> em geometria nativa do <i>Revit</i> usando <i>Python</i> . .....	79
Figura 28: Criação de geometria no <i>Revit</i> através das linhas base representadas no <i>Dynamo</i> . .....	80
Figura 30: Portas e janelas deslocadas da posição correta. ....	81
Figura 31: Imagens do processo de levantamento e modelagem convencional. ....	82
Figura 32: Imagens do processo de levantamento e modelagem proposto. ....	83
Figura 33: Modelo de referência com medidas coletadas com trena métrica (A) e com o levantamento por <i>LiDAR</i> (B). ....	83
Figura 34: Imagens do processo de levantamento e modelagem convencional. ....	85
Figura 35: Imagens do processo de levantamento e modelagem proposto. ....	86
Figura 36: Modelo de referência com medidas coletadas com trena métrica e eletrônica (A) e com o levantamento por <i>LiDAR</i> (B). ....	87
Figura 37: Representação de parede mais baixa que as demais. ....	90
Figura 38: Forros de diferentes alturas no mesmo ambiente. ....	91
Figura 39: Exemplo de escaneamento de ambiente com pé direito duplo. ....	93
Figura 40: Janela que conecta dois ambientes. ....	94
Figura 41: Erro em paredes côncavas e ortogonais no aplicativo <i>pCon.scan</i> . ..	95
Figura 42: Tentativa de escaneamento em local com parede envidraçada. ....	96
Figura 43: Escaneamento de parede curva no <i>pCon scan</i> . ....	97

Figura 44: Escaneamento de múltiplos ambientes.....	98
Figura 45: Representação do ambiente com o forro inclinado em duas águas (A), foto da geometria real do local (B). ....	99
Figura 46: Foto interna da FAUrb (A). Foto da fachada da FAUrb (B).....	103
Figura 47: Captura de tela do escaneamento com nuvem de pontos através do aplicativo <i>Polycam</i> para captar os desníveis.....	105
Figura 48: Captura de tela do saguão da FAUrb escaneado no pCon scan. .	107
Figura 49: Modelo no <i>Revit</i> criado a partir da união dos escaneamentos feitos. .....	110
Figura 50: Modelo analítico realçando as superfícies analíticas do modelo....	110
Figura 51: Captura de tela do <i>Revit</i> mostrando como aparecem os Relatórios de Análise gerados pelo System Analysis.....	111
Figura 52: Alguns dos gráficos apresentados no Relatório de Análise.....	112

### **Lista de Quadros**

Quadro 1: Comparação de tempo dos métodos de levantamento. ....	26
Quadro 2: Diferenças entre o Terrestrial Laser Scanner (TLS) e o LiDAR do iPhone. ....	27
Quadro 3: Comparação dos aplicativos citados pelos autores. ....	30
Quadro 4: Características dos aplicativos de escaneamento (atualizado Maio de 2025). ....	61
Quadro 5: Comparação entre os métodos convencional e proposto. ....	84
Quadro 6: Comparação entre os métodos convencional e proposto. ....	88
Quadro 7: Síntese dos resultados obtidos após a realização dos testes de geometrias específicas. ....	100

### Lista de Abreviaturas e Siglas

ASTB	Auto-Scan-To-BIM
API	Interface de Programação de Aplicativos
AP	Atendido Plenamente
AR	Atendido com Ressalvas
BIM	Building Information Modeling/ Modelagem da Informação da Construção
BEM	Building Energy Model
CARE	Engenharia Reversa Assistida por Computador
CEng	Centro de Engenharias
DSR	Design Science Research
ENCE	Etiqueta Nacional de Conservação de Energia
FAUrb	Faculdade de Arquitetura e Urbanismo
GbXML	Green Building XML
GUI	Interface Gráfica do Usuário
HBIM	BIM de Prédios Históricos
IFC	Industry Foundation Classes
INI-C	Instrução Normativa Inmetro para as Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas
INI-R	Instrução Normativa Inmetro para as Edificações Residenciais
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
Linse	Laboratório de Inspeção de Eficiência Energética em Edificações
LiDAR	Light detection and ranging
LoD	Level of development
LOIN	Level of Information Needed
ML	Modelos de Aprendizagem de Máquina
NA	Não Atendido
OIA	Organismo de Inspeção Acreditados
PBE-Edifica	Programa Brasileiro de Etiquetagem de Edifícios
PCD	Point Cloud Data
PET	Programa de Educação Tutorial
PROGRAU	Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo

RAC	Requisitos de Avaliação da Conformidade
RE	Engenharia Reversa
RTQ-C	Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos
SPRS	Journal of Photogrammetry and Remote Sensing
SSL	Solid State LiDAR
TLS	Escaneamento a Laser Terrestre
ToF	Tempo de Voo
UFPeI	Universidade Federal de Pelotas
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado

## Sumário

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	15
1.1 Contextualização	15
1.2 Problema de pesquisa	16
1.3 Questões de pesquisa	17
1.4 Objetivo geral	18
1.5 Objetivos específicos	18
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA</b>	19
2.1 Processos de levantamento	19
2.2.1. Fotogrametria e escaneamento laser	20
2.2.2. Escaneamento com LiDAR com dispositivos móveis	21
2.2 Do levantamento à modelagem	32
2.3 Do levantamento à simulação	35
2.4 BIM + Simulação	37
2.5 Etiquetagem de Eficiência Energética	40
2.6 Considerações sobre a revisão	42
<b>3. MÉTODO</b>	44
3.1. Estratégia de pesquisa	44
3.2. Exploração do conhecimento	47
3.2.1. Estudo exploratório	47
3.3. Construção do processo	51
3.3.1. Testes iterativos	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
3.4. Avaliação do método proposto	54
3.4.1. Estudo comparativo entre método proposto e método convencional de levantamento e modelagem	55
3.4.2. Estudos geométricos de casos específicos	57
3.4.3. Estudo de caso para avaliação do processo	58
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	61
4.1 Aplicativos existentes para escaneamento com LiDAR	61
4.2 Funcionamento do <i>RoomPlan</i>	64
4.3 Testes das alternativas de processo	67
4.2.1. Alternativa 1	68
4.2.2. Alternativa 2	73
4.2.3. Alternativa 3	76
4.4 Funcionamento da programação visual	78

4.5 Método convencional x Método proposto para levantamento e modelagem .....	82
4.6 Estudos geométricos de casos específicos .....	89
4.7 Estudo de caso para avaliação do processo.....	101
4.8 Diretrizes para repetição do processo.....	113
5. <b>CONCLUSÕES</b> .....	114
5.1 Limitações da pesquisa.....	116
5.2 Sugestões para trabalhos futuros .....	117
6. <b>REFERÊNCIAS</b> .....	119

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

Nas últimas décadas, a transformação digital na arquitetura e na construção civil tem impulsionado mudanças significativas nos processos de planejamento, projeto e gestão de edificações (Anarene et al., 2024). Tecnologias como o escaneamento 3D, os sensores integrados em dispositivos móveis e as plataformas de modelagem da informação da construção (Building Information Modeling – BIM) vêm sendo progressivamente incorporadas ao cotidiano profissional e acadêmico. Esse movimento responde a desafios históricos do setor, marcado por atrasos, custos elevados e baixa produtividade em comparação a outras áreas (Sopi et al., 2024). A digitalização desses processos não só amplia a eficiência, a sustentabilidade e a segurança na representação e no gerenciamento do ciclo de vida das edificações, mas também minimiza os riscos de erros humanos, muito frequentes no ramo da construção civil (Zhang et al., 2024).

Nesse contexto, o desafio de documentar edificações existentes — tarefa historicamente realizada com medições manuais e representações 2D — passou a contar com novas possibilidades técnicas, permitindo sua digitalização em modelos tridimensionais com alto grau de detalhamento. Essa transformação abre caminhos para a automação de processos que antes demandavam tempo, esforço repetitivo e maior propensão a erros.

Entre as várias áreas beneficiadas pela digitalização, destaca-se a etiquetagem de eficiência energética. Esse processo, que exige a geração de modelos analíticos baseados em dados geométricos e construtivos precisos, depende de uma representação digital compatível com os parâmetros exigidos pelos sistemas de avaliação. Há alguns anos, diversos estudos já têm explorado o uso de métodos de escaneamento e captura de dados em campo para geração de geometrias arquitetônicas (Tang et al., 2010; Volk, Stengel & Schultmann, 2014), assim como a aplicação do BIM na simulação energética e na etiquetagem de edificações (Bazjanac, 2008; Attia et al., 2012). Contudo, observa-se que essas abordagens frequentemente se desenvolvem de forma paralela, sem oferecer



fluxos integrados que conectem diretamente o levantamento digital ao modelo BIM voltado para eficiência energética. Nesse sentido, ainda persistem lacunas entre a coleta automatizada de dados e a geração de modelos compatíveis para etiquetagem — especialmente no que diz respeito à acessibilidade do processo para edificações que não contam com documentação digital.

## 1.2 Problema de pesquisa

A necessidade de etiquetar não apenas as novas edificações, mas também o vasto parque edificado no país vem sendo discutida em documentos e propostas relacionadas à política energética nacional (EPE, 2023). Esse contexto evidencia a urgência por métodos mais ágeis e acessíveis de levantamento e modelagem, capazes de viabilizar a etiquetagem de eficiência energética em larga escala. Entretanto, observa-se um descompasso entre a demanda potencial e a capacidade operacional disponível, já que atualmente apenas dois organismos são acreditados pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) para realizar esse tipo de inspeção no Brasil.

O novo documento dos Requisitos de Avaliação da Conformidade (RAC) representa um avanço ao possibilitar o uso de tecnologias mais modernas, como scanners a laser, ao deixar de restringir as inspeções ao uso exclusivo de trenas manuais e/ou eletrônicas (BRASIL, 2022). Nesse cenário, a incorporação de sensores LiDAR (*Light Detection and Ranging*) em dispositivos móveis, como iPhones e iPads, amplia as possibilidades de captura tridimensional de dados e oferece uma alternativa promissora para os levantamentos.

Apesar disso, a integração entre tecnologias de escaneamento digital e fluxos BIM aplicados à etiquetagem energética ainda não constitui objeto de estudos sistemáticos. A lacuna principal está justamente na ausência de pesquisas que consolidem esse processo como um fluxo integrado. O que se observa na literatura são análises isoladas que serão aprofundadas na revisão: no *Scan-to-BIM*, persistem desafios relacionados à padronização dos workflows e à confiabilidade dos modelos gerados a partir de nuvens de pontos (Macher et al., 2017; Ochmann et al., 2016; Zeng et al., 2023); já no *BIM-BEM*, destacam-se limitações quanto à interoperabilidade entre softwares, inconsistência dos dados

de entrada e indefinição do nível de detalhe necessário para simulações energéticas (Gao et al., 2019; Rodrigues, 2023). Essa lacuna metodológica demonstra que, embora as ferramentas já estejam disponíveis, ainda não existem processos consolidados que tornem sua adoção prática, confiável e acessível no contexto brasileiro de etiquetagem de eficiência energética integrando de forma consistente, os três momentos essenciais — levantamento, modelagem e simulação.

### **1.3 Questões de pesquisa**

Com o avanço das políticas de eficiência energética no setor da construção civil, têm sido discutidas propostas para a ampliação da obrigatoriedade da etiquetagem de edificações, que hoje se restringe a novos edifícios públicos federais e àqueles submetidos a reformas relevantes (BRASIL, 2025). Nesse cenário, cresce a necessidade de tornar mais ágil e acessível o processo de obtenção da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE), de modo a viabilizar sua aplicação em escala mais ampla.

Visando um trabalho contínuo e lógico de avanço das tecnologias computacionais, já é possível fazer uso da metodologia BIM para a análise de inspeção de eficiência energética, exigindo menos tempo, retrabalho, equipe e conhecimento de diferentes softwares para uma única etiqueta (Rodrigues, 2023). Buscando trabalhar em outras frentes no processo de etiquetagem, e conseguir reduzir o tempo de trabalho durante a etapa de levantamento até chegar ao modelo BIM, foi formulada a seguinte questão primária de pesquisa:

- I. Como desenvolver um processo integrado de levantamento, modelagem e simulação que, a partir de dados coletados por escaneamento com o sensor LiDAR, que resulte em modelos BIM apropriados para avaliação da eficiência energética de edificações existentes?

Também foram formuladas as seguintes questões secundárias:

- a) Como é feito o reconhecimento dos dados pelos softwares BIM quando feito um escaneamento através de aplicativos que utilizam o LiDAR de dispositivos móveis?
- b) Quais informações são demandadas de um modelo 3D para ser feita a avaliação de eficiência energética pelo método de simulação e como chegar a esse nível de detalhe através de um escaneamento laser?
- c) Quais etapas desse processo integração do levantamento-modelagem-simulação são atendidas de forma automatizada e quais não?

#### **1.4 Objetivo geral**

O objetivo desta pesquisa é desenvolver e avaliar um processo que integre dados obtidos por escaneamento feito com dispositivos móveis contendo sensor LiDAR, com plataformas BIM, visando à criação de modelos paramétricos nativos em ambiente BIM, adequados para simulações de eficiência energética em edificações existentes. Para tanto, pretende-se propor diretrizes para a captura de dados e para a estruturação das informações necessárias, de modo a viabilizar um fluxo contínuo entre levantamento, modelagem e simulação.

#### **1.5 Objetivos específicos**

- a) Investigar as potencialidades e limitações do escaneamento a laser em dispositivos móveis para captura tridimensional de edificações existentes.
- b) Analisar as possibilidades de integração entre os dados gerados por escaneamento e plataformas BIM, considerando diferentes formatos e métodos disponíveis no mercado.
- c) Estruturar e testar um processo sistematizado que permita a conversão dos dados de escaneamento em modelos BIM nativos, com foco na aplicação em simulações de eficiência energética.
- d) Propor diretrizes para a aplicação do processo em diferentes contextos, identificando suas limitações e oportunidades de aprimoramento.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Processos de levantamento

O levantamento arquitetônico de edificações existentes é uma etapa fundamental para intervenções projetuais, reformas ou análises técnicas. Historicamente, essa atividade tem sido realizada de forma manual, utilizando instrumentos simples como trena métrica, prancheta e rascunhos feitos à mão. Esse método, ainda amplamente utilizado, caracteriza-se pela sua simplicidade, mas também apresenta algumas limitações importantes. Conforme aponta Faltýnová (2016), além de ser um processo trabalhoso e demorado, o levantamento manual demanda, frequentemente, a atuação conjunta de pelo menos duas pessoas para garantir maior agilidade nas medições e na documentação.

A introdução da trena eletrônica trouxe avanços para esse tipo de levantamento, possibilitando maior precisão em algumas medições. No entanto, seu uso não elimina a necessidade da trena métrica, sendo comum que ambas sejam intercaladas durante o processo. Ainda assim, as anotações continuam sendo registradas manualmente em esboços ou plantas impressas, exigindo uma etapa posterior de transposição para meios digitais.

Segundo Salamanca (2012), esse processo de levantamento e digitalização pode comprometer a precisão das informações, uma vez que envolve o julgamento subjetivo do profissional tanto na coleta quanto na interpretação e inserção dos dados em softwares de modelagem.

No contexto da engenharia e construção civil, existem abordagens distintas para o desenvolvimento e análise de sistemas e edificações. Por exemplo, a engenharia direta envolve o processo de transformar uma ideia altamente abstrata em uma implementação física de um sistema. Em contraste, a engenharia reversa (RE) se refere à análise de objetos já existentes. A RE é um processo para obter um modelo tridimensional computacional de um objeto existente por meio de medições, sem considerar suas funcionalidades. Esse processo é também conhecido como Engenharia Reversa Assistida por

Computador (CARE), que envolve as etapas de coleta de dados, construção de malha e ajuste de superfície (Page et al., 2008).

Utilizando modelos digitalmente replicados de edificações já existentes, a RE permite realizar uma análise detalhada das estruturas e características do edifício de maneira rápida e precisa. O termo *as built* trata dessa representação final de uma edificação construída, refletindo com precisão todas as alterações feitas em relação ao projeto original durante a execução da obra (Tang, 2010).

A produção desses modelos *as built* tem se tornado uma etapa essencial na documentação de edificações existentes, tanto para fins de manutenção e reforma quanto para a atualização de projetos e análises estruturais e energéticas. Nesse contexto, o uso de tecnologias de captura tridimensional tem ganhado destaque, ampliando a precisão e eficiência dos levantamentos arquitetônicos (Tang, 2010). Entre essas tecnologias, a fotogrametria digital e o escaneamento a laser vêm sendo investigados como meios de otimizar a aquisição de dados no ambiente construído. Tais métodos têm sido aplicados, por exemplo, no monitoramento de obras, na avaliação de deformações e na modelagem em BIM, oferecendo uma base sólida para análises técnicas e comparações com projetos originais (Dezen-Kempton, 2015).

### **2.1.1. Fotogrametria e escaneamento laser**

As principais técnicas de levantamento 3D da edificação são a Fotogrametria e o Escaneamento a Laser, onde ambas resultam na geração de nuvens de pontos para representação dos elementos capturados (Dezen-Kempton, 2015).

As nuvens de pontos são representações tridimensionais compostas por milhares de pontos individuais no espaço, cada um contendo informações de posição (coordenadas XYZ) e, em alguns casos, cor ou intensidade. Essa representação é frequentemente utilizada como base para a modelagem de edificações existentes, sobretudo em fluxos que visam a criação de modelos BIM (Rashdi et al., 2022).

Enquanto a fotogrametria depende do processamento de múltiplas imagens para reconstruir a geometria do ambiente por meio de algoritmos de correspondência

de pontos, o escaneamento a laser, frequentemente associado à tecnologia LiDAR, realiza a medição direta da distância entre o sensor e os objetos, gerando uma malha de pontos com alta densidade e precisão. Ambas as técnicas têm suas vantagens e limitações, e a escolha entre elas geralmente depende de fatores como o tipo de ambiente, a resolução desejada, o custo envolvido e a finalidade do levantamento (Dezen-Kempton et al., 2015).

O estudo feito por Mello (2024), testou dois métodos de aquisição de dados em quatro estudos de caso, sendo dois externos e dois internos. Nos estudos externos, foi utilizada a fotogrametria aérea com o uso de VANTs (Veículo Aéreo Não Tripulado), que se mostrou eficaz para a documentação de áreas externas, destacando-se pela qualidade das imagens capturadas, agilidade na coleta e integração relativamente simples com plataformas BIM. Apesar disso, a técnica exigiu cuidados específicos com o planejamento do voo e apresentou desafios relacionados ao processamento das imagens, como a necessidade de limpeza manual dos dados gerados. Ainda assim, a fotogrametria demonstrou-se confiável, sendo capaz de identificar desvios dimensionais relevantes em relação ao projeto original, validando sua precisão quando associada a levantamentos tradicionais. O método utilizado para os levantamentos internos será abordado no item 2.2.2.

### **2.1.2. Escaneamento com LiDAR com dispositivos móveis**

Nos últimos anos, a tecnologia LiDAR deixou de estar restrita a equipamentos de grande porte, como os *Terrestrial Laser Scanners* (TLS), para ser incorporada também a dispositivos móveis, ampliando as possibilidades de aplicação e reduzindo barreiras de custo e logística. Essa evolução permitiu que técnicas antes exclusivas de levantamentos especializados passassem a ser realizadas de forma mais ágil e acessível, sem renunciar a resultados satisfatórios para determinadas finalidades.

Existem equipamentos que, assim como o TLS, são projetados exclusivamente para levantamentos, mas que operam de forma dinâmica, sem a necessidade de permanecer estáticos durante a captura. Roggeri et al. (2022) apresentam a aplicação do escaneamento a laser com o dispositivo móvel Leica BLK2GO,

destacando sua eficácia na captura de dados em ambientes internos. Diferentemente dos escâneres estacionários, o escâner móvel permite a coleta contínua da nuvem de pontos enquanto o operador se desloca pelo espaço, o que reduz significativamente o tempo de escaneamento e facilita o levantamento em edifícios compartimentados ou com geometrias complexas. No entanto, a tecnologia móvel pode apresentar menor precisão em comparação com modelos estacionários, especialmente em ambientes amplos ou com necessidade de detalhamento fino, exigindo cuidados adicionais na calibração e no processamento da nuvem de pontos.

Embora presente em equipamentos dedicados exclusivamente a levantamentos, a tecnologia LiDAR, a partir de 2020, foi incorporada também em dispositivos móveis como o iPhone Pro e o iPad Pro, promovendo uma verdadeira transformação no escaneamento a laser ao torná-lo mais acessível e versátil (Cuperschmid et al., 2024). O LiDAR utiliza medições de Time of Flight (ToF), que determinam o tempo que um objeto, partícula ou onda leva para percorrer uma determinada distância. Dessa forma, o sensor emite um pulso ou sinal de luz modulado e mede a diferença de tempo na onda refletida de volta (Schuon et al., 2008).

Segundo Luetzenburg et al. (2021), o LiDAR integrado a dispositivos móveis emite pulsos em um espectro próximo ao infravermelho por meio de uma matriz 2D, ideal para esse tipo de aplicação devido às dimensões compactas, à boa relação entre consumo e fornecimento de energia e à largura de banda de comprimento de onda estreita. Esse sistema projeta uma matriz de  $8 \times 8$  pontos, que é difratada em grades de  $3 \times 3$ , resultando em um total de 576 pontos, conforme ilustrado na Figura 1(a). A distância focal, de 26 mm, é a mesma da câmera principal de 12 MP do iPad e do iPhone, com alcance máximo de até 5 metros.

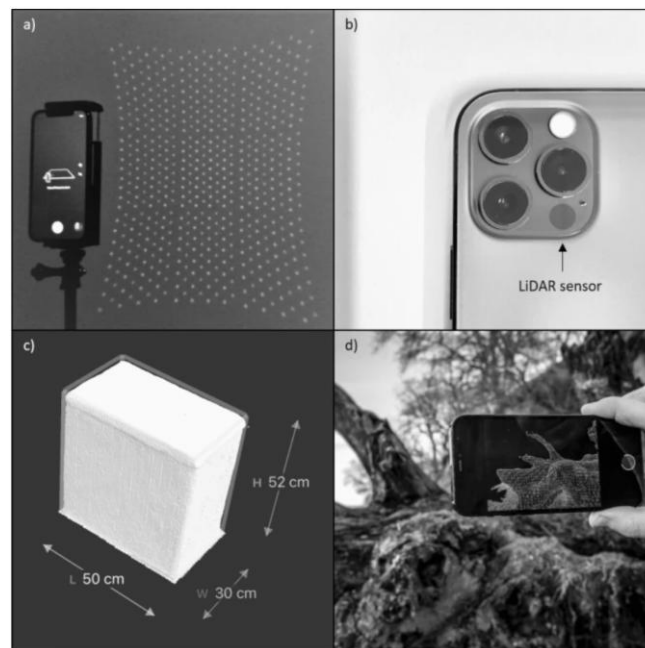


Figura 1: iPhone com o sensor LiDAR emitindo uma matriz de  $8 \times 8$  pontos difratados em grades de  $3 \times 3$  (a), sensor no iPhone 12 Pro (b), modelo 3D de um objeto com dimensões (c), aplicativo digitalizando um ambiente externo (d).

Fonte: Luetzenburg et al. (2021) – página 4.

Aragón e Quevedo (2023) analisaram o uso de diversas tecnologias de escaneamento disponíveis em dispositivos móveis para determinar a viabilidade e eficiência desses métodos na captura e processamento de dados arquitetônicos. Foi criado um guia para aplicação desse processo. Na Figura 2, os autores demonstram como deve ser feita a execução do escaneamento.

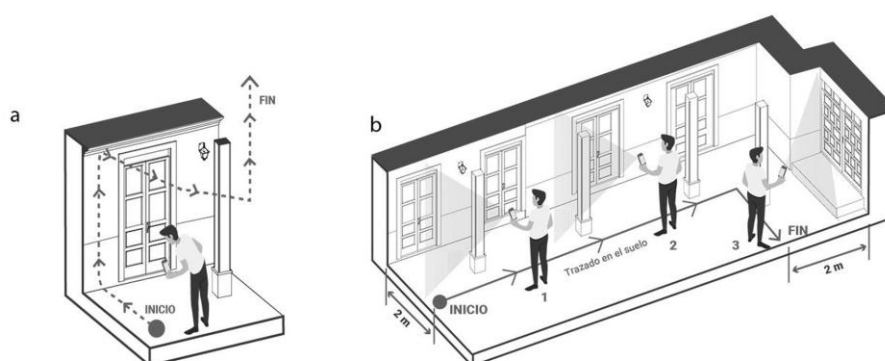


Figura 2: Esquema de execução do escaneamento: movimento que o dispositivo móvel deve realizar, iniciando da parte inferior para a superior (a) movimento horizontal de quem estiver realizando o escaneamento (b).

Fonte: Aragón e Quevedo (2023) – página 59.



A capacidade de realizar escaneamentos detalhados com um dispositivo portátil e fácil de usar democratiza o acesso ao escaneamento laser, tornando-o disponível não apenas para profissionais. Em contrapartida, a qualidade técnica é inferior à encontrada em dispositivos específicos de escaneamento a laser (Díaz-Vilariño et al., 2022).

No estudo feito por Vogt et al. (2021), a comparação entre o LiDAR do iPad Pro de 2020 e um scanner 3D industrial buscou analisar essa alta precisão para detalhes em pequenos objetos. Para isso, diferentes peças de Lego foram escolhidas e, como resultado, se concluiu que a tecnologia LiDAR não é aplicável para escaneamento de pequenos objetos devido à baixa precisão, mas que para ambientes maiores pode ter potencial.

A respeito da precisão na captura de ambientes com LiDAR, Teo e Yang (2023) demonstraram que, ao utilizar o iPad Pro de forma estática, é possível alcançar uma acurácia na ordem de 1 mm. Já quando é feita uma captura dinâmica, sua precisão é de em torno de 1cm. Sendo assim, afirmam que para uma melhor precisão, o levantamento deve ser feito em pequenas áreas, com pouco movimento do sensor. Ele possui limitações para mapeamento de grandes áreas ou aplicações de alta precisão, porém se mostrou promissor para a detecção de barreiras arquitetônicas, especialmente em áreas de difícil acesso (Díaz-Vilariño et al., 2022).

O estudo de Murtiyoso et al. (2021) avaliou o uso do Solid State LiDAR (SSL) do iPad Pro 2020 para documentação de patrimônios e comparou seus resultados com técnicas tradicionais como fotogrametria e escaneamento a laser terrestre (TLS). Os resultados mostraram que, embora o LiDAR seja rápido e fácil de usar, no momento da pesquisa, apresentou menor precisão geométrica e maior ruído, ou seja, pontos fora do padrão da densidade geral da nuvem de pontos ou em posições fisicamente incoerentes. Ainda assim, o sensor LiDAR apresenta resultados promissores em termos de qualidade geométrica, mas o ruído pode reduzir sua aplicabilidade. Por isso, como em muitos projetos, conhecer a aplicação final é crucial na escolha do sensor a ser utilizado.

A Figura 3 mostra um quadro de comparação entre os métodos utilizados na pesquisa, evidenciando, em verde, os indicadores positivos e, em vermelho, os negativos de cada um dos itens avaliados.

	TLS	DSLR Photogrammetry	SSL
Aquisição			
Custo	●●●●●	●●●●●	●●●●●
Tempo	●●●●●	●●●●●	●●●●●
Ergonomia	●●●●●	●●●●●	●●●●●
Média	●●●●●	●●●●●	●●●●●
Processamento			
Custo	●●●●●	●●●●●	●●●●●
Tempo	●●●●●	●●●●●	●●●●●
Ergonomia	●●●●●	●●●●●	●●●●●
Média	●●●●●	●●●●●	●●●●●
Nuvem de pontos			
Detalhe	●●●●●	●●●●●	●●●●●
Ruído	●●●●●	●●●●●	●●●●●
Média	●●●●●	●●●●●	●●●●●

Figura 3: Comparação entre o Scanner a Laser Terrestre (TLS), a Fotogrametria (DSLR) e o LiDAR do iPad Pro (SSL).

Fonte: Traduzida de Murtiyoso et al. (2021) - Página 603.

Outro estudo que buscou determinar a precisão do LiDAR do iPhone, comparando a um levantamento feito com um Escâner a Laser Terrestre (TLS), foi o de Aragón e Quevedo (2023), conforme demonstrado na Figura 4. É possível perceber pequenas diferenças entre o TLS e o levantamento com o iPhone, mas de poucos milímetros.

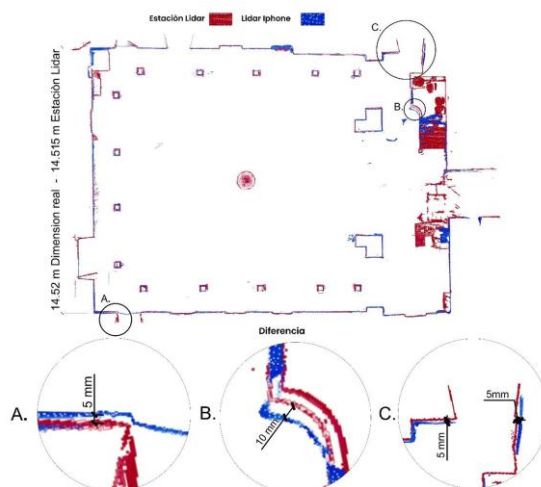


Figura 4: Comparação do levantamento TLS com o levantamento LiDAR.

Fonte: Aragón e Quevedo (2023) – página 82.

Os mesmos autores também compararam no quesito tempo os métodos de levantamento abordados, como mostra o quadro da Quadro 1. A integração dos dados escaneados com processos BIM foi feita a partir da modelagem manual dos elementos arquitetônicos tomando por base a nuvem de pontos inserida. Segundo os autores, isso melhorou a gestão documental e facilitou a preservação e conservação do patrimônio arquitetônico.

Tiempo del proceso del levantamiento para los 309 m2- 1 nivel		
Método	Recurso Humano	Tiempo
Manual	2 personas	8 horas
Android Fotogrametría	1 persona	3,5 horas
IPhone LiDAR	1 persona	3 horas
Estación LiDAR	1 persona	1,5 horas

Quadro 1: Comparação de tempo dos métodos de levantamento.

Fonte: Aragón e Quevedo (2023) – página 85.

Com isso, percebe-se que a comparação entre o Terrestrial Laser Scanner (TLS) e o LiDAR do iPhone 13 Pro revela diferentes abordagens na captura de dados tridimensionais para aplicações de levantamento arquitetônico. Enquanto o TLS é um dispositivo dedicado, projetado para capturar nuvens de pontos de alta precisão e detalhamento em grandes áreas, o LiDAR do iPhone utiliza uma tecnologia similar em um formato compacto e portátil. A análise presente no Quadro 2 visa destacar as características distintas de cada tecnologia, incluindo precisão, alcance, portabilidade e custo, e como esses fatores influenciam a escolha entre ambos para diferentes necessidades de levantamento e modelagem de edificações existentes.

	<b>TLS</b>	<b>LiDAR</b>	<b>Referência</b>
<b>Precisão</b>	Alta precisão (até milímetros)	Menos preciso (alguns centímetros)	Noguchi et al. (2023)
<b>Alcance</b>	Longo alcance (centenas de metros)	Alcance limitado (cerca de 5 metros)	Noguchi et al. (2023)
<b>Equipamento</b>	Equipamentos maiores e mais pesados, requerem um tripé e geralmente precisam de um operador treinado.	Compacto e portátil, embutido no dispositivo móvel, fácil de usar por qualquer pessoa sem treinamento especializado.	Noguchi et al. (2023)
<b>Custo</b>	Caro, tanto o equipamento quanto o custo de operação, incluindo o treinamento e manutenção.	Muito mais acessível, pois é integrado ao dispositivo que muitas pessoas já possuem.	Razali et al. (2022)
<b>Qualidade dos dados</b>	Produz nuvens de pontos de alta densidade e precisão, capturando detalhes minuciosos de superfícies	Nuvens de pontos de menor densidade e precisão, suficiente para visualizações básicas e medições aproximadas.	Razali et al. (2022)
<b>Tempo de captura</b>	Pode ser mais demorado, dependendo da área e da resolução desejada.	Ideal para capturas rápidas e não tão detalhadas.	Noguchi et al. (2023)
<b>Processamento de dados</b>	Envolve captura de dados, transferência para um computador, processamento com software especializado, e posterior análise e uso dos modelos 3D.	Workflow mais integrado, com captura e processamento inicial realizados no dispositivo. Usuários podem visualizar resultados imediatamente e exportar dados. Pode também exportar dados para um processamento avançado no computador.	Moyano et al. (2023)
<b>Levantamento estático/ dinâmico</b>	Geralmente mais preciso devido à ausência de movimento e possibilidade de múltiplas varreduras do mesmo ponto. Requer múltiplas posições fixas para cobrir uma grande área.	Menos preciso devido ao movimento contínuo, mas suficiente para muitas aplicações práticas. Cobre grandes áreas rapidamente, ideal para levantamentos extensivos.	Teo e Yang (2023)

Quadro 2: Diferenças entre o Terrestrial Laser Scanner (TLS) e o LiDAR do iPhone.

Fonte: Autora (2024).

Na pesquisa desenvolvida por Mello (2024), além dos estudos externos realizados com a técnica de fotogrametria, citados anteriormente, também foi investigada a aplicação do sensor LiDAR em dispositivos móveis em dois estudos de caso realizados em ambientes internos. Foram apontadas limitações relacionadas à presença de objetos no local e à variação na iluminação, que impactaram negativamente a qualidade da coleta. O tratamento da nuvem de pontos gerada exigiu tempo e recursos computacionais consideráveis, o que reforça a necessidade de planejamento e cuidados operacionais para uma aplicação eficaz.

A coleta de dados, porém, se mostrou ágil e adequada ao contexto, evidenciando o potencial da tecnologia para levantamentos rápidos. O autor comparou o levantamento tradicional com trena ao uso do LiDAR e obteve resultados compatíveis com os obtidos pelas medições tradicionais, indicando a viabilidade da tecnologia para ambientes internos. A reconstrução do modelo BIM, embora possível, demandou grande esforço manual e conhecimento técnico por parte do usuário.

Com a popularização desse novo método de levantamento pelo celular, surgiram diversos aplicativos dedicados à captura e processamento de nuvens de pontos diretamente nesses aparelhos. Askar e Sternberg (2023) testaram a precisão da nuvem de pontos e o manuseio do usuário de quatro aplicativos utilizando o iPhone 13 Pro em comparação a um TLS, são eles: *3DScanner*, *PolyCam*, *Scaniverse* e *SiteScape*. Dos quatro aplicativos usados, segundo os autores, o *Polycam* foi o que obteve menos distorções em relação ao TLS. Em relação a eficácia na obtenção de valores de desvio de até 10 cm, só a do *Scaniverse* não foi satisfatória, apresentando um desempenho inferior. Com exceção do *SiteScape*, que exigiu várias digitalizações para cobrir uma única área, os outros aplicativos destacaram-se pela capacidade de digitalizar áreas maiores sem interrupções. Apesar disso, o *SiteScape* manteve uma qualidade satisfatória na nuvem de pontos. Todos os aplicativos ofereceram recursos práticos para processamento e exportação de dados.

O estudo feito por Losè et al. (2022) utilizou dois dispositivos Apple® (iPad Pro e iPhone 12 Pro) e três aplicativos iOS (*SiteScape*, *EveryPoint* e *3D Scanner App*) para avaliar o desempenho do sensor LiDAR em condições estáticas e

dinâmicas. Os testes de precisão foram feitos a partir de uma comparação de um levantamento feito com um TLS e os resultados dos três aplicativos, conforme Figura 5. As condições de iluminação tiveram efeito mínimo na qualidade da nuvem de pontos. As limitações incluem erros de desvio em aquisições mais longas, independente do aplicativo, porém o *SiteScape* foi o que apresentou melhor desempenho.



Figura 5: Comparação da nuvem de pontos gerada pelo TLS, 3D Scanner App, SiteScape e EveryPoint.

Fonte: Losè et al. (2022) – página 22.

O estudo de Vacca (2023) investiga o potencial do sensor LiDAR do iPad Pro para a produção de modelos 3D de bens de patrimônio cultural. Quatro aplicativos foram testados: *Polycam*, *Sitescape*, *3D Scanner* e *Scaniverse*, permitindo diferentes configurações e modos de escaneamento. Cinco estudos de caso foram realizados em elementos arquitetônicos e culturais, incluindo abóbadas, colunas, fachadas, fontes e um violino.

Os aplicativos *Polycam* e *3D Scanner* apresentaram os melhores resultados em termos de precisão e resolução. O *Sitescape* mostrou dificuldades em reconstruir corretamente alguns elementos e o *Scaniverse* apresentou bons resultados, especialmente em objetos pequenos. O artigo destaca a funcionalidade do modo "Room" do *Polycam*, que permite gerar planimetrias em formato DXF.

O Quadro 3 representa um comparativo entre informações positivas e negativas dos aplicativos mais citados pelos autores estudados.

Aplicativo	Vantagens	Desvantagens
<b>3D Scanner App</b>	Boa precisão e resolução (Vacca, 2023)	Algumas áreas podem não ser capturadas totalmente (Askar e Sternberg, 2023).
<b>PolyCam</b>	Boa precisão e resolução. Modo “Room” permite gerar planimetrias (Vacca, 2023) Menos distorções em comparação aos outros (Askar e Sternberg, 2023).	Pode apresentar distorções em áreas específicas (Vacca, 2023).
<b>SiteScape</b>	Alta densidade de pontos e bom desempenho em superfícies grandes (Vacca, 2023). Apresentou bom desempenho em aquisições mais longas em comparação com os outros aplicativos (Losè et al., 2022).	Requer múltiplas digitalizações para áreas maiores (Askar e Sternberg, 2023). Dificuldades em reconstruir corretamente alguns elementos (Vacca, 2023).
<b>Scaniverse</b>	Modos de escaneamento baseados no tamanho do objeto. Exportação em formatos variados e georreferenciados (Askar e Sternberg, 2023). Bons resultados em objetos pequenos (Vacca, 2023).	Desvios de precisão maiores que 10cm (Askar e Sternberg, 2023).

Quadro 3: Comparação dos aplicativos citados pelos autores.

Fonte: Autora (2024).

Além da aplicação na arquitetura, o LiDAR tem mostrado potencial significativo em outras áreas de medição. Gollob et al. (2021) propuseram considerações sobre o uso do LiDAR do iPad para inventário florestal. Os resultados foram comparados com métodos tradicionais de medição de diâmetro de árvores, mostrando que o LiDAR do iPad pode fornecer técnicas mais rápidas e flexíveis em comparação com os métodos convencionais, embora altas precisões e resoluções espaciais ainda precisem ser alcançadas. Da mesma forma, Luetzenburg et al. (2021) avaliaram o uso do iPhone 12 Pro, explorando diferentes aplicativos para o levantamento 3D de rochas e penhascos para fins

geológicos. Eles destacaram o alto potencial e a competitividade da tecnologia integrada em um smartphone, sublinhando que isso representa uma inovação revolucionária com desenvolvimentos promissores esperados no futuro próximo.

Como afirmam Mêda, Calvetti e Sousa (2023), por ser um assunto muito recente, poucos estudos científicos abordaram o levantamento utilizando o LiDAR integrado aos aparelhos celulares, ainda mais quando relacionado a algum outro tópico específico, como é o caso dessa pesquisa. Ainda assim, as pesquisas que abordam o levantamento 3D ou sua compatibilidade com o BIM, abordam apenas a possibilidade de escaneamento LiDAR gerando nuvens de pontos.

O modo “*Room*”, conforme descrito no site do aplicativo *Polycam*, utiliza as capacidades de hardware LiDAR juntamente com algoritmos de processamento sofisticados, tornando possível usar o iPhone ou o iPad para criar rapidamente uma representação 3D precisa de qualquer espaço interno. Aberturas, móveis e eletrodomésticos são detectados automaticamente, assim como a cor das paredes, janelas e armários. Paredes e tetos curvos, quando existentes, também são capturados e representados durante a digitalização (Polycam, 2024).

Outro aplicativo que permite essa funcionalidade é o *MagicPlan*. O blog dos seus desenvolvedores destaca a combinação da realidade aumentada com a inteligência artificial. Esse modo no aplicativo é capaz de detectar e classificar objetos de forma automática durante o escaneamento das nuvens de pontos, identificando elementos básicos como pisos e paredes simultaneamente. Isso significa que o aplicativo realiza, durante o escaneamento, todo o processo que seria necessário para gerar uma geometria a partir de uma nuvem de pontos. Esse avanço tecnológico simplifica significativamente a captura de dados e a criação de modelos 3D, automatizando etapas que, de outra forma, demandariam um esforço manual substancial (Magicplan, 2020).



## 2.2 Do levantamento à modelagem

Essas tecnologias de levantamento não apenas transformaram a forma como os ambientes são registrados, mas também abriram novas possibilidades para sua integração direta com plataformas de modelagem. Nesse contexto, torna-se cada vez mais relevante compreender como os dados obtidos no levantamento podem alimentar fluxos de trabalho em BIM, potencializando o uso da informação desde as fases iniciais do projeto até a operação e manutenção da edificação.

O BIM é uma metodologia que permite a criação e gestão de representações digitais de uma edificação, integrando não apenas sua geometria, mas também informações relevantes sobre materiais, sistemas, cronogramas e custos. Diferente dos modelos 3D tradicionais, o BIM estrutura dados de forma que possam ser utilizados ao longo de todo o ciclo de vida do edifício — desde o planejamento e projeto até a execução, operação e manutenção —, promovendo maior eficiência, precisão e colaboração entre os diferentes agentes envolvidos no processo construtivo (Eastmann et al., 2011).

A riqueza de detalhes fornecidas pelo escaneamento garantem que os modelos BIM sejam mais completos, com todas as informações necessárias no decorrer do projeto. Essa integração dos dados de escaneamento laser com o BIM facilita a manutenção de um banco de dados atualizado do estado atual da edificação.

O *Scan-to-BIM* foi um termo iniciado em estudos de modelagem BIM de prédios históricos (HBIM), buscando automatizar o processo de criação de um modelo a partir da leitura de nuvem de pontos para possibilitar um projeto de restauração. Já o *Scan-vs-BIM* é usado geralmente em canteiros de obras para verificar se a construção das paredes e instalações está de acordo com o modelo projetado através de uma análise comparativa na sobreposição dos modelos (Abreu et al., 2023). Os autores destacam que ambas as abordagens têm aplicações distintas, mas complementares, no ciclo de vida de projetos de construção.

Ambos são temas de grande interesse em inúmeras pesquisas pelo mundo. No estudo feito por Macher et al. (2017), a reconstrução dos elementos do edifício foi realizada de forma semiautomática, onde inicialmente foram feitas segmentações sucessivas na nuvem de pontos e identificados os planos que compõem as paredes, tetos e pisos. Em seguida, os elementos estruturais foram

descritos em formato *obj* e reconstruídos com base nas nuvens de pontos extraídas, assumindo diversas condições para a reconstrução. A abordagem semi-automática agiliza o processo de reconstrução a partir de nuvens de pontos, porém a intervenção manual ainda é crucial para garantir a precisão e a qualidade do modelo BIM resultante.

Ochmann et al. (2016) apresentaram uma abordagem baseada em parâmetros para a reconstrução de modelos 3D com nuvens de pontos de ambientes internos. O modelo reconstruído foi produzido combinando diferentes varreduras de diferentes salas para detectar automaticamente aberturas de paredes, como portas e janelas. Embora essas metodologias tenham reduzido o tempo de pós-processamento, a abordagem ainda exigia escaneamentos a laser a partir de posições fixas em cada sala e segmentação manual de sala para iniciar o processo.

Já, utilizando a abordagem do *Scan-vs-BIM*, Lawani et al. (2024) utilizaram um projeto de construção em andamento como estudo de caso para avaliar a utilidade do escaneamento a laser no ajuste de modelos 3D estruturais a partir de dados de nuvem de pontos. Os dados da nuvem de pontos foram integrados com o BIM para explorar a precisão dos processos de construção, capturando a condição "*as-built*" da estrutura. A Figura 6 representa as diferenças entre os termos Scan-to-BIM e Scan-vs-BIM para Point Cloud Data (PCD).

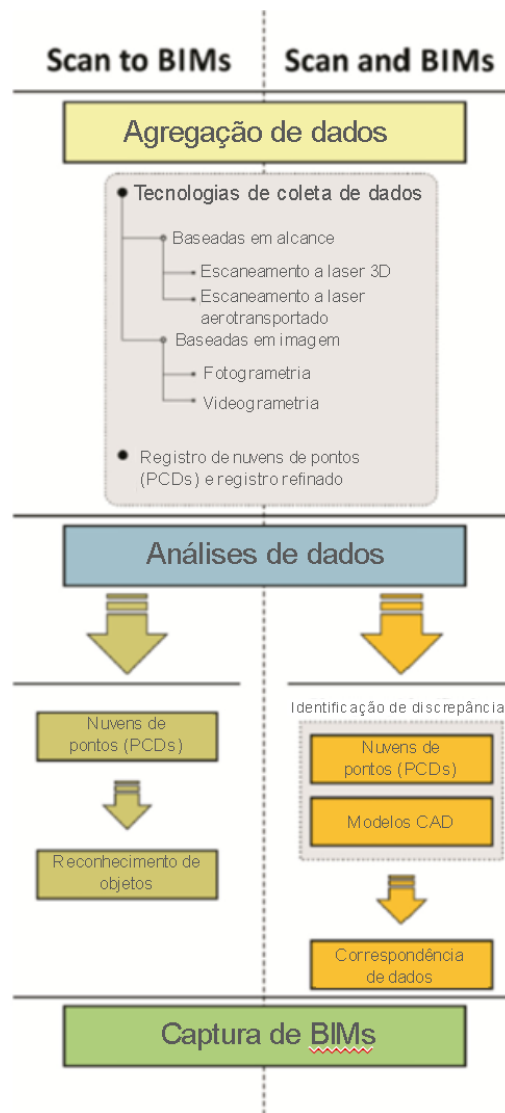


Figura 6: Scan-to-BIM e Scan-vs-BIM.

Fonte: Lawani et al. (2024) – página 7.

O estudo de Zeng et al. (2023) propôs o desenvolvimento de um sistema chamado *Auto-Scan-To-BIM* (ASTB) para gerar automaticamente um modelo BIM a partir de dados de nuvem de pontos. A metodologia do ASTB é dividida em três módulos principais.

O primeiro módulo utiliza uma abordagem de segmentação de região expandida aprimorada com métodos de detecção de linha de limite de plano e algoritmos de recalibração de canto para detectar planos em um ambiente escaneado. O segundo módulo aplica um método heurístico baseado no conhecimento do domínio para analisar as características dos planos reconhecidos, associando-

os aos elementos de construção correspondentes, como paredes, pisos, tetos, janelas e portas, e criando os modelos BIM. O terceiro módulo é responsável pela geração de um modelo completo em formato IFC, garantindo a compatibilidade com diversos softwares BIM (Zeng et al., 2023).

Esta abordagem visa facilitar a integração dos dados "*as-built*" capturados em campo com os modelos digitais. A Figura 7 ilustra as etapas do sistema proposto.

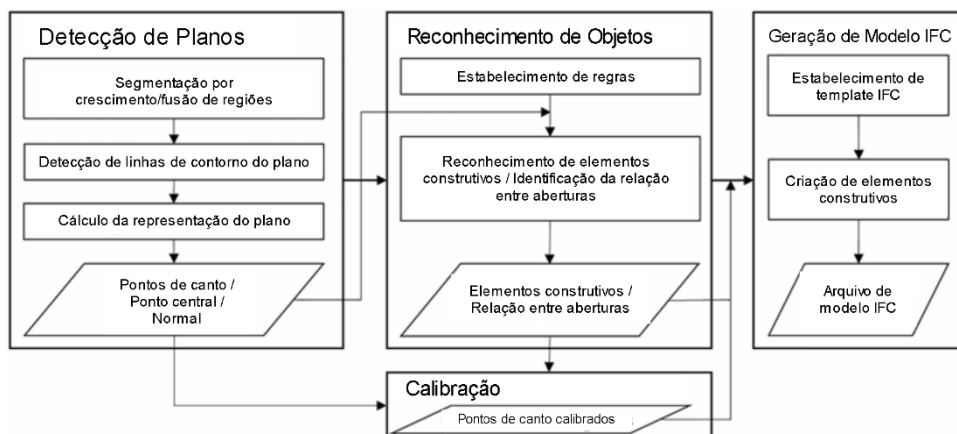


Figura 7: Fluxograma do sistema proposto pelos autores.

Fonte: Zeng et al. (2023) – página 5.

A eficiência do ASTB foi evidenciada pela alta precisão na detecção de planos e na criação de modelos BIM detalhados, facilitando a avaliação de qualidade, controle de cronograma e análise de desempenho energético em projetos de construção. Embora os resultados sejam promissores, o estudo também identificou algumas limitações, como a necessidade de aprimoramentos para lidar com geometrias complexas e a precisão na determinação da espessura dos elementos (Zeng et al., 2023).

## 2.3 Do levantamento à simulação

Alguns estudos que serão apresentados na sequência têm explorado a integração da tecnologia do escaneamento a laser direto com a simulação de eficiência energética, eliminando a necessidade de uma etapa intermediária de modelagem em softwares BIM convencionais. Essa abordagem se destaca pela

sua capacidade de fornecer dados precisos para simulações, mesmo em projetos onde não há documentação prévia.

O'Donnell et al. (2019) utilizaram um TLS com sensor LiDAR para obter a simulação de eficiência energética de uma fachada. Isso foi feito de modo semiautomatizado, onde se extraiu um modelo de nuvem de pontos e se imputou alguns dados manualmente para análise de desempenho no *Energy Plus*. A Figura 8 mostra o processo de reconstrução de fachada proposto pelo autor.

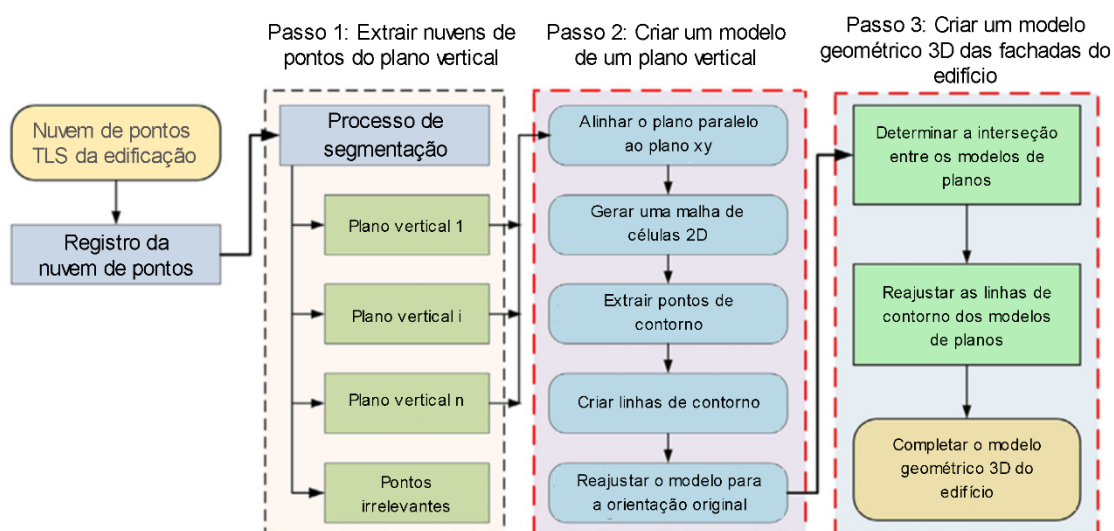


Figura 8: Método para reconstrução de fachada usando dados coletados por Laser Scanner.

Fonte: O'Donnell et al., 2019 – página 5.

Essas etapas, embora detalhadas e estruturadas, mostram que a intervenção manual ainda desempenha um papel significativo, o que pode impactar a eficiência global do processo. Este mesmo estudo trouxe também aspectos positivos a serem levados em conta em relação a precisão do escaneamento a laser para simulação computacional. Os autores alegam que apesar de haver variação na precisão da geração do modelo, particularmente nos andares superiores dos edifícios de teste, os impactos energéticos resultantes dessas variações representaram menos de 1% do consumo energético. Isso indica que, apesar de certas imprecisões no modelo, a metodologia se mostrou eficaz para a avaliação de eficiência energética, demonstrando a robustez e a aplicabilidade prática do processo proposto.

Garwood et al. (2018) propõe usar o levantamento a laser para capturar a geometria interna de uma indústria e processar automaticamente os dados para produzir um arquivo gbXML, usado para simulações térmicas. Alguns dos problemas relatados durante o escaneamento foram em relação a detecção de partes envidraçadas, onde os reflexos acabaram gerando grandes níveis de ruído. Em relação aos resultados, para validar a metodologia, a geometria foi modelada manualmente e os resultados das simulações foram comparados com dados de contas de energia passadas, mostrando uma redução de 85% no tempo de trabalho.

## **2.4 BIM + Simulação**

Através de softwares com a metodologia BIM, pode se obter uma construção virtual equivalente a uma edificação real, possuindo assim, informações detalhadas da composição dos materiais de cada elemento (Eastmann et al., 2011). Essas informações podem ser usadas para criar tabelas e planilhas eletrônicas que fornecem uma visão geral do edifício (Zemero, 2016). Já o BEM é uma metodologia que utiliza modelos computacionais para estimar o comportamento térmico e o consumo energético de edificações, permitindo a simulação de cenários diversos, avaliação de desempenho e identificação de estratégias de otimização (Ciccozzi, 2023).

A compatibilidade do BIM com o BEM se tornou um assunto de grande interesse dos pesquisadores por ser fundamental para garantir que os dados gerados em uma plataforma de modelagem possam ser integrados e utilizados em softwares de simulação sem perda de informações ou necessidade de retrabalho. Além da maior eficiência, redução de erros e economia de tempo, a interoperabilidade facilita a colaboração entre diferentes equipes e disciplinas, permitindo um fluxo de trabalho mais integrado e contínuo.

No entanto, segundo Eastmann et al. (2011), existem desafios significativos como a complexidade dos dados envolvidos, a falta de padrões universalmente aceitos e a necessidade de constante atualização e adaptação das ferramentas para garantir compatibilidade. Além disso, problemas de interoperabilidade podem levar a inconsistências nos dados e dificuldades na validação dos

modelos, comprometendo a precisão das simulações e a tomada de decisões baseadas nelas (Eastmann et al., 2011).

Rodrigues (2022), em uma revisão de trabalhos sobre a integração BIM-BEM, observa que a interoperabilidade entre esses softwares ainda não foi totalmente alcançada. O BEM ainda não se beneficia de um fluxo contínuo de informações na modelagem digital. Por exemplo, informações que já estão disponíveis em modelos BIM precisam ser reinseridas manualmente nas ferramentas BEM, um processo demorado e trabalhoso. Além disso, a troca de dados BIM-BEM enfrenta barreiras comuns, como perda de dados e informações e inconsistências nas transformações geométricas (Gao et al., 2019).

As ferramentas BEM possuem uma Interface Gráfica do Usuário (GUI) e um mecanismo de simulação. GUIs, como *OpenStudio*, *BEopt*, *DesignBuilder* e *eQuest*, tornam a modelagem mais acessível ao oferecer uma interface gráfica intuitiva para os usuários. Em segundo plano, os motores de simulação, como *EnergyPlus* e *DOE2*, executam os cálculos necessários. Dois dos formatos de arquivo BIM mais utilizados em simulações energéticas são o *Industry Foundation Classes* (IFC) e o *Green Building XML* (gbXML) (Kamel e Memari, 2019).

A partir da versão 2020.1, o *software Autodesk Revit* incorporou ao programa a ferramenta “*Systems Analysis*”, capaz de realizar simulações energéticas diretamente a partir do modelo BIM. Mesmo se utilizando de outros programas no *background* (*OpenStudio* e *EnergyPlus*), essa ferramenta é capaz de gerar relatórios no ambiente do *Revit*, permitindo que o projetista obtenha resultados sem precisar utilizar outros programas, representando ganho de tempo e aumento na produtividade (Autodesk Revit, 2023).

Rodrigues (2023) obteve resultados de avaliação da eficiência energética de edificações a partir do método de simulação da INI-C utilizando o *software Autodesk Revit*. O estudo, desenvolvido com o intuito de viabilizar a otimização do processo de etiquetagem de edificações, avaliou a ferramenta “*System Analysis*” do *Revit* 2023 em várias etapas. Foram realizados estudos de caso exploratórios divididos em simulações de desempenho, geométricas e para etiquetagem. 83,33% dos casos geométricos testados tiveram sua geometria

corretamente exportada pelo *Revit*. Foram realizadas etiquetas de quatro edificações, confirmando que, embora a ferramenta ainda exija algumas correções manuais, apresenta um potencial significativo para otimizar o processo de etiquetagem energética. O estudo conclui que a ferramenta pode ser considerada um avanço tecnológico importante e uma possibilidade real de otimização no processo de etiquetagem por simulação.

Para que a simulação energética funcione corretamente, é necessário converter os dados do modelo BIM em um formato que possa ser interpretado por softwares BEM. De acordo com informações do site da Autodesk, no caso do *Revit*, essa conversão ocorre por meio da geração do modelo analítico da edificação. Esse modelo é construído a partir da interseção dos limites dos ambientes com uma grade tridimensional conhecida como *voxel*. O resultado é uma representação analítica composta por volumes (espaços) e superfícies, que concentram as informações relevantes para a simulação. Essas informações são atualizadas automaticamente sempre que um novo modelo analítico é gerado, garantindo a coerência entre o modelo geométrico e sua versão analítica (Autodesk Revit, 2023).

Os espaços analíticos são derivados dos ambientes ou espaços criados pelo projetista no modelo arquitetônico e são os volumes onde ocorrem as trocas de energia. No entanto, eles reportam diferentes áreas e volumes em relação ao ambiente ou espaço original, pois as medidas analíticas são calculadas a partir das linhas centrais das paredes e do limite superior dos pisos e telhados, diferente dos ambientes do projeto arquitetônico, que são calculados pelo perímetro interno de cada ambiente (Rodrigues, 2023).

Segundo Rodrigues (2023), é fundamental que a criação de elementos como pisos e forros seja feita a partir da linha central das paredes. Caso contrário, o modelo analítico poderá apresentar inconsistências nos volumes gerados, comprometendo a precisão das simulações. A modelagem correta garante que os limites do espaço fechado sejam reconhecidos de forma adequada pelo sistema, evitando falhas nos cálculos de área e volume. Um modelo corretamente construído desde a etapa de levantamento facilita significativamente a obtenção da ENCE, seja por simulação ou pelo método simplificado.



## 2.5 Etiquetagem de Eficiência Energética

A eficiência energética refere-se ao uso racional da energia, buscando o melhor aproveitamento dos recursos disponíveis com o menor desperdício possível (EPE, 2025). No contexto da construção civil, isso implica projetar, construir e operar edificações que demandem menos energia para manter condições adequadas de conforto térmico, lumínico e funcional ao longo de sua vida útil. A importância da eficiência energética tem crescido mundialmente diante dos desafios relacionados à crise climática, à necessidade de redução das emissões de gases de efeito estufa e à busca por soluções sustentáveis que promovam o equilíbrio entre desenvolvimento urbano e preservação ambiental. Assim, edificações energeticamente eficientes não apenas reduzem custos operacionais, como também contribuem para metas globais de sustentabilidade (Allouhi et al., 2015).

A Etiqueta Procel de Eficiência Energética é um programa brasileiro que visa promover a eficiência energética em diferentes setores. O programa estabelece critérios de desempenho energético para equipamentos e produtos, como aparelhos de ar-condicionado, geladeiras e, mais recentemente, também para edifícios. O Programa Brasileiro de Etiquetagem de Edifícios (PBE-Edifica) foi implementado pelo INMETRO e instituído pela Eletrobras/Procel. A etiqueta é atribuída a edifícios residenciais, comerciais, públicos e de serviços com base em um sistema de classificação que varia de "A" (mais eficiente), a "E" (menos eficiente), indicando o desempenho energético do edifício (PBE EDIFICA, 2024).

Conforme a Instrução Normativa nº 02/2014 (BRASIL, 2014), as novas edificações públicas federais, e as antigas que passem por *retrofit* (modernização, renovação ou adaptação de uma estrutura existente para melhorar seu desempenho, eficiência ou estética), são obrigadas a obterem a ENCE classe A de eficiência energética.

A proposta da Análise de Impacto Regulatório indica que, até 2040, a obrigatoriedade de atendimento a índices mínimos de eficiência energética deverá ser estendida a todas as novas edificações no Brasil — incluindo residenciais, comerciais, de serviços e habitações de interesse social — com implementação escalonada a partir dos edifícios públicos federais. Essa

expansão progressiva busca tornar a etiquetagem energética uma exigência para o licenciamento de novas obras, inclusive aquelas voltadas ao mercado imobiliário.

Para a avaliação das edificações, existem duas etiquetas resultantes: 1- Etiqueta de Projeto; 2 - Etiqueta de Edifício Construído. A Etiqueta de Projeto tem validade por 5 anos e é feita a partir do projeto da edificação. Já a Etiqueta de Edifício Construído tem caráter definitivo e é realizada através de uma verificação *in loco* se o edifício foi construído conforme o projeto etiquetado previamente.

Quando não há etiqueta de projeto, é necessário realizar toda a análise a partir do projeto como construído (*as built*). O cliente deve fornecer as plantas e informações detalhadas da edificação. Para viabilizar a simulação, exigida na maioria dos casos para a etiquetagem, é obrigatória a modelagem tridimensional no software de simulação. Isso significa que o profissional responsável precisa, muitas vezes, partir de arquivos em *PDF* ou *DWG* para desenvolver um modelo digital completo, integrando os dados técnicos relevantes. Essa etapa exige tempo e domínio de software especializado.

Apesar de ainda manter os dois métodos de análise — o simplificado e o de simulação —, segundo Rodrigues (2020), a adoção do novo método resultou em um aumento de até 41% no tempo necessário para realizar as avaliações. O método simplificado antes era o método predominante de avaliação para emissão da ENCE, porém, a nova legislação limitou a sua aplicação. A maior quantidade de dados necessários para a análise e a dificuldade de extração de algumas dessas variáveis dos projetos enviados, também tendem a sobrecarregar os organismos avaliadores.

Muta et al. (2022) utilizaram o software *Autodesk Revit* para modelagem e extração de dados geométricos, automatizando alguns dados e coletando outros manualmente, para avaliação da eficiência energética da envoltória pelo método simplificado da INI-C, aplicando esses dados ao Metamodelo – modelo que descreve a estrutura, regras e elementos usados, servindo como linguagem que padroniza como um modelo deve ser construído e interpretado. A pesquisa destacou a viabilidade da Etiquetagem de Eficiência Energética usando softwares BIM, demonstrando seu grande potencial.

A simulação oferece uma análise mais detalhada e precisa do desempenho energético da edificação, permitindo a consideração de variáveis complexas e a obtenção de resultados mais confiáveis. Além disso, a simulação possibilita a avaliação de diferentes cenários e a identificação de oportunidades para melhorias na eficiência energética, contribuindo para a otimização do processo de etiquetagem e para a promoção de práticas de construção mais sustentáveis.

A complexidade do modelo pode variar de acordo com o objetivo da simulação, podendo ser mais detalhado ou simplificado conforme necessário. Todas as simulações envolvem simplificações da realidade, e seus resultados estão diretamente ligados à precisão das especificações do modelo empregado (Robinson, 2008).

## **2.6 Considerações sobre a revisão**

O avanço das tecnologias de levantamento arquitetônico tem transformado significativamente a forma como edificações existentes são documentadas. Dentre essas tecnologias, o escaneamento a laser se destaca por sua alta precisão, rapidez e capacidade de capturar dados detalhados em alta resolução. Embora a fotogrametria represente uma alternativa viável, ela apresenta limitações em espaços internos ou reduzidos, onde o ângulo restrito das fotografias pode gerar distorções e comprometer a qualidade da nuvem de pontos. Assim, o escaneamento a laser se consolida como a abordagem mais robusta e confiável para atender às atuais demandas de precisão e eficiência.

Dentro desse contexto, a escolha pelo uso de dispositivos móveis com sensor LiDAR, como iPhones e iPads, é especialmente relevante. Esses equipamentos oferecem vantagens em termos de acessibilidade, portabilidade e facilidade de operação. Ao contrário dos escâneres terrestres a laser, os dispositivos móveis não exigem treinamento especializado e têm um custo significativamente menor, tornando possível que instituições envolvidas na etiquetagem energética disponibilizem vários aparelhos para levantamentos simultâneos em diferentes locais. Essa escalabilidade operacional contribui para ampliar o alcance do processo de etiquetagem, permitindo a análise de um número maior de edificações em menos tempo e com recursos mais enxutos.

Ainda que as nuvens de pontos geradas por essa tecnologia sejam extremamente ricas em dados, sua utilização direta foi descartada neste trabalho. A modelagem manual a partir da nuvem exige tempo e conhecimento técnico, o que não se justifica frente ao objetivo de gerar modelos analíticos simplificados para simulações de eficiência energética.

Neste cenário, torna-se essencial compreender as diferentes formas de levantamento com o uso do LiDAR, avaliando os aplicativos disponíveis e os formatos de exportação gerados. O objetivo é identificar soluções que possibilitem a geração semiautomatizada de modelos BIM, reduzindo a interferência manual e tornando o processo mais eficiente.

Adicionalmente, este estudo tem como base o trabalho de Rodrigues (2023), que aplicou o método de simulação energética a partir de modelos desenvolvidos no Autodesk Revit. Assim, a presente pesquisa direciona-se à modelagem e compatibilização dos dados escaneados no ambiente BIM, de modo a viabilizar a geração de modelos prontos para a aplicação do método de simulação proposto pelo autor.

Por fim, opta-se pela avaliação por meio do método de simulação — considerado adequado por eliminar a necessidade de divisão manual em zonas térmicas. Essa abordagem permite maior automatização do processo e reforça a viabilidade do uso de dispositivos móveis com LiDAR como ferramenta de apoio ao desenvolvimento de modelos BIM voltados à simulação energética, contribuindo para a ampliação e agilidade na etiquetagem de edificações existentes.

### 3. MÉTODO

#### 3.1. Estratégia de pesquisa

Neste trabalho foi adotada a *Design Science Research* (DSR), que se concentra na criação de artefatos para resolver problemas práticos. Os artefatos podem ser produtos, serviços, sistemas, processos ou até métodos que solucionam problemas de forma satisfatória (Dresch, Lacerda e Antunes, 2014).

Conforme destaca Hevner (2019), a DSR está idealmente posicionada para gerar contribuições tanto para a pesquisa quanto para a prática no campo da inovação digital.

Essa forma de inovação refere-se à apropriação de tecnologias digitais no processo e como resultado da inovação, envolvendo a combinação de componentes digitais e físicos para a criação de produtos ou soluções inéditas (Yoo et al., 2010).

A inovação digital abrange fenômenos como o surgimento de novas tecnologias digitais, a digitalização da informação e a gestão da inovação com maior alcance e impacto, inclusive atravessando fronteiras organizacionais (Yoo et al., 2010; Fichman et al., 2014). Nesse sentido, o DSR oferece uma estrutura adequada para o desenvolvimento e a validação de soluções inovadoras que combinam recursos digitais com aplicações práticas, como é o caso do método proposto neste trabalho.

No caso deste estudo, desenvolveu-se um processo que vai desde o levantamento até a simulação percorrendo um caminho fluido e eficiente. Sendo assim, foram estudados os métodos para levantamento 3D de edificações existentes para o uso proposto, e um processo para integração desse modelo com o BIM de maneira facilitada e automatizada.

A condução do estudo através do DSR se dá por 3 fases: **Exploração do conhecimento** (compreensão da problemática envolvida); **Construção do processo** (desenvolvimento da solução proposta com base nas especificações definidas na fase de exploração); **Avaliação do método** (teste e validação da eficácia da solução desenvolvida).

O modelo proposto por Bunge (1980) se destaca por articular a compreensão e a resolução de problemas com o desenvolvimento de soluções tecnológicas aplicáveis. Nessa abordagem, ele enfatiza a construção e avaliação de artefatos com base em problemas do mundo real. Assim, as etapas descritas foram utilizadas para guiar o desenvolvimento da solução proposta nesta dissertação, desde a identificação e delimitação do problema até a elaboração, avaliação e refinamento da solução. A Figura 9 ilustra graficamente as seis etapas do método de Bunge (1980) divididas entre as 3 fases de condução do DSR, destacando seu caráter iterativo e pragmático, essencial para a criação de tecnologias eficazes e contextualizadas.

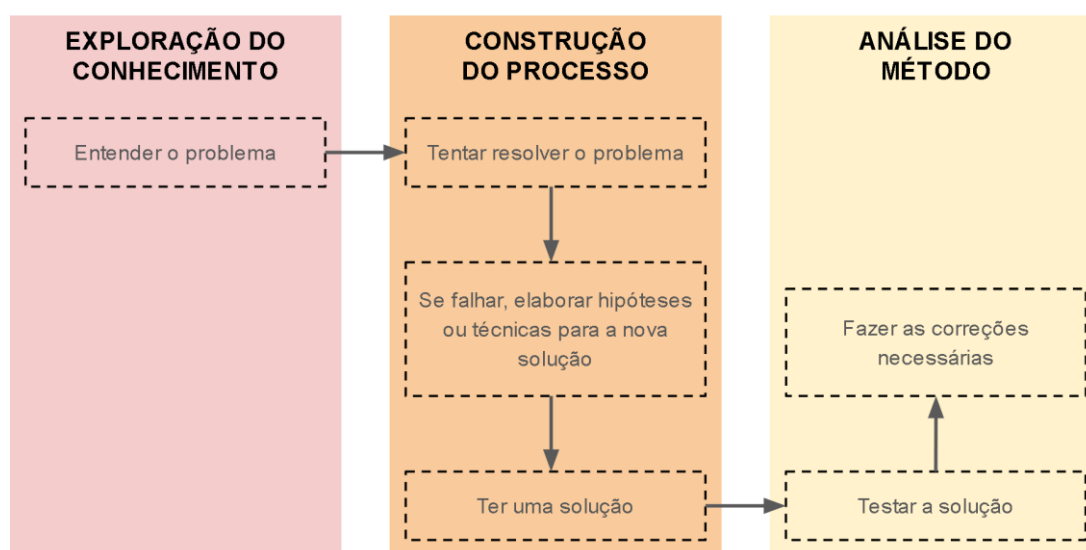


Figura 9: Passos para conduzir a pesquisa tecnológica.

Fonte: Autora (2025) adaptado de Bunge (1980).

A Figura 10 detalha o delineamento específico desta pesquisa, abordando as etapas de exploração do conhecimento, construção do processo, análise do método junto dos resultados esperados, demonstrando como essas fases dialogam com as etapas de Bunge e garantem a progressividade e refinamento da solução proposta.

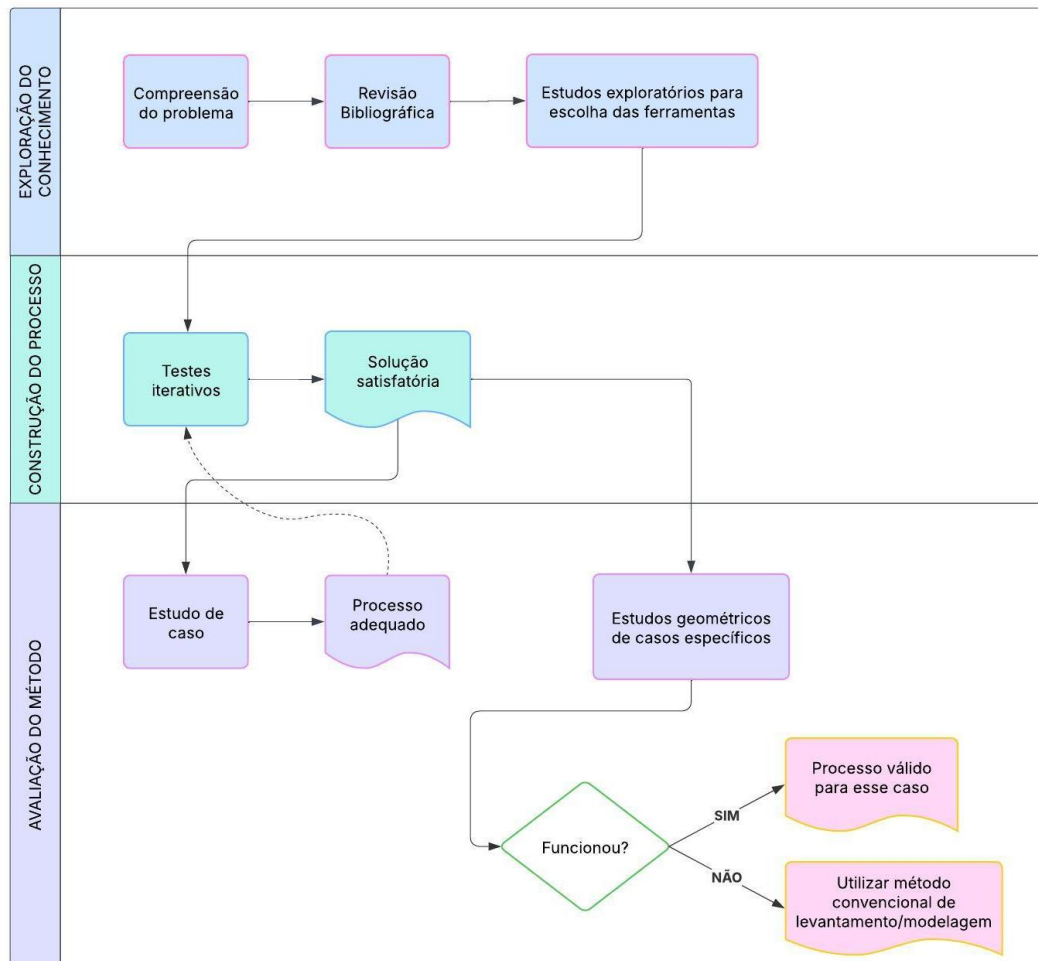


Figura 10: Delineamento da pesquisa e etapas metodológicas.

Fonte: Autora (2025).

### 3.2. Exploração do conhecimento

Através de uma revisão de literatura e de testes exploratórios, buscou-se a conscientização das etapas existentes no processo para que possam ser tomadas algumas decisões importantes para o orientar o desenvolvimento da solução.

Essa etapa inicial está relacionada ao que Lacerda et al. (2013) definem como a fase de conscientização no processo de DSR, na qual ocorre a identificação e a delimitação do problema a ser resolvido, incluindo o entendimento do seu contexto externo e a caracterização das soluções desejáveis.

Segundo Manson (2006), nesse momento devem ser desenvolvidas e avaliadas possíveis alternativas de artefato que possam atender ao problema identificado. O resultado dessas etapas é a consolidação de um direcionamento claro para o desenvolvimento da solução proposta, baseada na articulação entre teoria, prática e viabilidade técnica.

A fase de exploração visou aprofundar o conhecimento do pesquisador no tema de obtenção de modelos 3D a partir de levantamentos digitais com LiDAR, sua compatibilidade com ambientes de modelagens BIM e aplicações em avaliação de eficiência energética, especialmente por simulação computacional. Além disso, buscou-se compreender os critérios geométricos para possibilitar a simulação computacional, identificando os métodos e as variáveis de entrada para a simulação.

Com isso, foram definidas as ferramentas digitais a serem aprofundadas neste trabalho, identificando suas potencialidades e limitações frente ao objetivo proposto. Essas ferramentas, usadas ao longo do processo são: aplicativos de escaneamento, software de modelagem e software de simulação de eficiência energética.

- **Estudo exploratório**

O estudo exploratório nesta etapa buscou fazer uma seleção de ferramentas adequadas para solucionar o problema. A escolha do *Autodesk Revit* como ambiente de modelagem neste estudo foi motivada pela necessidade de



encontrar uma solução que permitisse integrar de forma contínua as etapas de modelagem geométrica e simulação de eficiência energética, com o mínimo de retrabalho e sem a dependência de múltiplas ferramentas.

Diferentemente de plataformas como o *SketchUp*, que, apesar de populares e acessíveis, não oferecem suporte nativo ao nível de detalhamento informacional e analítico exigido por fluxos BIM completos, o *Revit* permite a construção de modelos paramétricos ricos em dados, diretamente compatíveis com simulações energéticas e outras análises de desempenho.

Essa decisão está fundamentada na abordagem apresentada por Rodrigues (2023), que demonstra a viabilidade do uso do próprio *Revit*, por meio do recurso *Systems Analysis*, para a criação de modelos analíticos voltados à simulação de eficiência energética. A adoção dessa estratégia evita a exportação para outras plataformas ou ferramentas externas, reduzindo a possibilidade de perda de informações, erros de compatibilidade ou retrabalho na conversão dos dados — desafios frequentes quando se depende de softwares que não integram nativamente o fluxo BIM.

Com isso, o *Revit* se apresenta não apenas como uma ferramenta que atende diretamente aos objetivos iniciais deste estudo — facilitar o processo de etiquetagem de edificações existentes — mas também como uma plataforma mais robusta e abrangente, capaz de ampliar o potencial de aplicação da metodologia desenvolvida. Embora a motivação inicial tenha sido viabilizar simulações energéticas, o uso do *Revit* permite estender os benefícios do levantamento digital automatizado a outros processos de projeto, *retrofit*, documentação técnica e gestão do ciclo de vida das edificações.

Essa definição moldou a estrutura do projeto desde as etapas iniciais, direcionando os esforços para viabilizar a chegada da volumetria capturada no levantamento digital diretamente ao ambiente do *Revit*. Desde o princípio, buscou-se garantir que o fluxo entre a aquisição dos dados e a construção do modelo analítico fosse o mais direto e automatizado possível, evitando etapas intermediárias e complexas. Ainda assim, foram consideradas outras metodologias, ferramentas e fluxos de trabalho, avaliando criticamente sua viabilidade técnica e compatibilidade com os objetivos do estudo.

A revisão bibliográfica teve papel central nesse processo, ao reunir e analisar diferentes abordagens sobre os processos de levantamento digital, conversão em modelo BIM e aplicação em simulações, fundamentando assim a escolha da plataforma e norteando o desenvolvimento das hipóteses metodológicas testadas ao longo da pesquisa. Essa análise permitiu identificar a possibilidade de que, por meio de um escaneamento utilizando o framework RoomPlan, criado pela Apple®, fosse viável obter dados volumétricos suficientes para gerar um modelo geométrico compatível com as exigências de simulação. Essa hipótese orientou o delineamento da solução proposta, baseada na premissa de compatibilidade direta entre o levantamento e a plataforma escolhida, para gerar um modelo pronto para simulação, conforme demonstra o processo representado na Figura 11.



Figura 11: Etapas envolvidas no processo.

Fonte: Autora (2025).

Foram selecionados diferentes aplicativos de escaneamento com suporte para LiDAR para a realização de testes, com o objetivo de analisar sua aplicabilidade prática na captura de dados tridimensionais de edificações, analisando suas funcionalidades, limitações e potencial de integração com a modelagem BIM. Os testes foram realizados de maneira consistente no mesmo local, utilizando apenas aplicativos que utilizem o sensor LiDAR.

Cada aplicativo tem o seu nome para os diferentes modos de escaneamento, mas representam o mesmo tipo de resultado. Para este estudo foi utilizado, em alguns momentos, o termo “modo RoomPlan” para se referir ao levantamento com LiDAR utilizando o *Framework RoomPlan*, que compreende os elementos construtivos do ambiente e gera um modelo 3D geométrico com paredes, portas

e janelas já definidos no seu resultado. A partir desses testes, foram selecionados apenas os aplicativos que possuísem o modo RoomPlan, para que fossem comparados também em outros quesitos.

Após o escaneamento, os dados tridimensionais foram exportados em diferentes formatos. Foram realizados testes para avaliar a compatibilidade e a integridade dos dados ao serem importados no *Revit*, com foco na geração de modelos BIM contendo elementos de paredes, portas e janelas nativos do *software*.

É importante destacar que esses testes não representaram ainda o processo proposto como solução para o problema de pesquisa. Trata-se, antes de qualquer coisa, de um estudo preliminar voltado à análise das possibilidades tecnológicas atualmente disponíveis no mercado, com o objetivo de compreender suas limitações, potenciais e implicações na geração de modelos BIM compatíveis com simulações.

A exportação dos modelos gerados por cada aplicativo, bem como os testes iniciais de inserção desses modelos no ambiente *Revit*, configuraram-se como uma etapa exploratória fundamental para a formulação de hipóteses e delimitação do problema. Essa investigação empírica inicial serviu para aprofundar o entendimento dos desafios envolvidos e subsidiar, com base prática, a construção do processo proposto. Dessa forma, a exploração não apenas ampliou o repertório técnico do estudo, mas também consolidou a base sobre a qual o desenvolvimento do artefato foi estruturado.

O local utilizado para testar as possibilidades de escaneamento nesse estudo exploratório esteve presente nas três fases principais do desenvolvimento — exploração do conhecimento, construção do processo e análise do método. A continuidade dos testes nesse espaço permitiu observar, ajustar e refinar progressivamente a proposta, contribuindo para a coerência entre os objetivos iniciais e os resultados obtidos em cada etapa. O espaço em questão corresponde a um recorte de apartamento residencial, e foi utilizado em diferentes momentos da pesquisa. Sua utilização se mostrou conveniente pela facilidade de acesso e pela possibilidade de realizar múltiplos levantamentos sob condições variadas. Além disso, sua configuração espacial reúne características

pertinentes para análise, mantendo-se simples o suficiente para permitir a repetição sistemática dos testes ao longo do desenvolvimento do método.

O recorte analisado corresponde a dois ambientes internos conectados: uma sala de planta ortogonal e um corredor adjacente, sem separação física entre eles por meio de paredes ou portas, conforme mostra a Figura 12. Nesse momento do estudo, essa configuração permitiu observar o desempenho dos aplicativos na detecção de elementos contínuos entre espaços interligados. A área conta com uma janela e cinco portas distribuídas ao longo do perímetro, o que enriqueceu a avaliação quanto à identificação e captura de aberturas — um aspecto fundamental para os objetivos desta pesquisa.

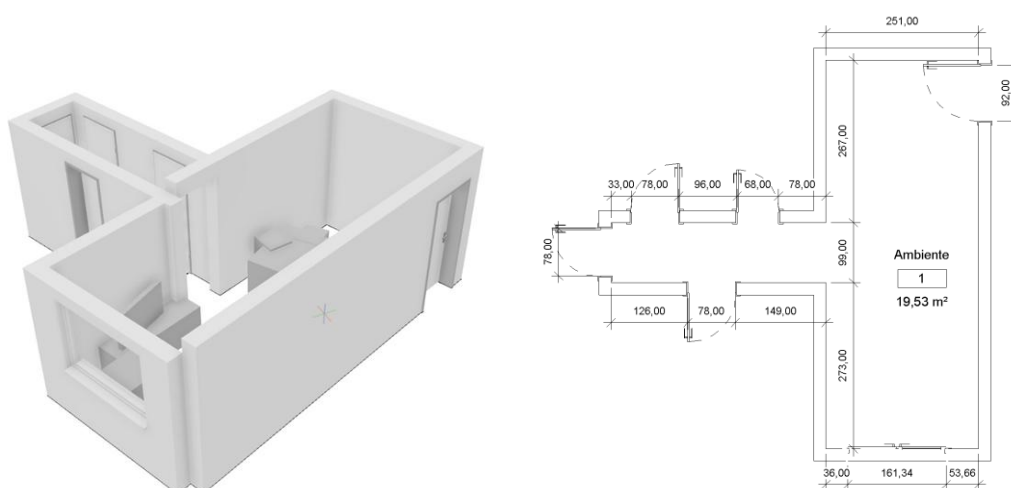


Figura 12: Objeto de estudo exploratório.

Fonte: Autora (2025).

### 3.3. Construção do processo

Esta fase detalha o processo metodológico que foi empregado para integrar os dados de levantamento digital, coletados através do LiDAR do iPhone 13 Pro, com a modelagem BIM, buscando uma integração direta entre o levantamento e a avaliação da eficiência energética, buscando reduzir etapas intermediárias e retrabalho. Ela visa descrever, passo a passo, como as ferramentas e técnicas selecionadas na fase de exploração do conhecimento foram implementadas na prática. Nesta fase, são aplicadas técnicas iterativas para refinar e melhorar a solução.

Ao explorar a fundo os modos de escaneamento e as possibilidades de exportação durante a fase anterior, consegue-se estabelecer uma base sólida para a construção dos artefatos essenciais à execução deste estudo. Conforme aponta Simon (1996), nessa fase de construção do artefato busca-se desenvolver soluções satisfatórias para problemas em que uma solução ótima seria inacessível ou inviável. Isso implica na definição prévia de critérios de aceitação e na justificativa dos parâmetros que serão considerados adequados.

No contexto deste estudo, a solução ideal — embora atualmente inviável — seria que os modelos escaneados pelos aplicativos pudessem ser exportados diretamente no formato *.rvt*, nativo do *Revit*, sem necessidade de conversões ou ajustes intermediários.

No entanto, por se tratar de um formato proprietário e fechado, o formato *.rvt* não é suportado diretamente por outras plataformas. Assim, a interoperabilidade entre *softwares* BIM costuma ocorrer por meio do formato *.ifc*, um padrão aberto que possibilita a troca de dados, ainda que com perdas ou limitações nas informações contidas em cada elemento. Essa limitação reforça a necessidade de desenvolver um processo que viabilize, mesmo que com simplificações, a integração entre os modelos escaneados e o ambiente de simulação no *Revit*.

A construção do artefato em si pode utilizar diferentes abordagens, como algoritmos computacionais, representações gráficas, protótipos, entre outros (Lacerda et al. 2013). A metodologia empregada, baseada em representações computacionais e fluxos automatizados, visa gerar um artefato funcional, mas também generalizável, ou seja, aplicável a uma classe mais ampla de problemas, conforme destacam Venable (2006) e Hevner et al. (2004).

Na fase de construção do processo, o foco deixa de ser a simples exploração de alternativas disponíveis no mercado para se concentrar na aplicação e nos testes das alternativas que fundamentam o processo em construção. Embora o mesmo objeto de estudo exploratório — um recorte de apartamento — tenha sido novamente utilizado nesta etapa, a finalidade agora é distinta. Se na etapa anterior o objetivo era compreender as possibilidades oferecidas pelos diferentes aplicativos e formatos de exportação, nesta fase inicial do desenvolvimento o mesmo ambiente serve como base para testar, comparar e ajustar as estratégias

propostas para integração da geometria no *Revit*. Isso marca uma transição importante entre investigar o problema e começar a delinear uma solução potencial.

Com base nos formatos exportados durante os testes exploratórios, foram realizadas diferentes tentativas de modos para importar a geometria obtida pelos aplicativos de escaneamento para o ambiente do *Revit*.

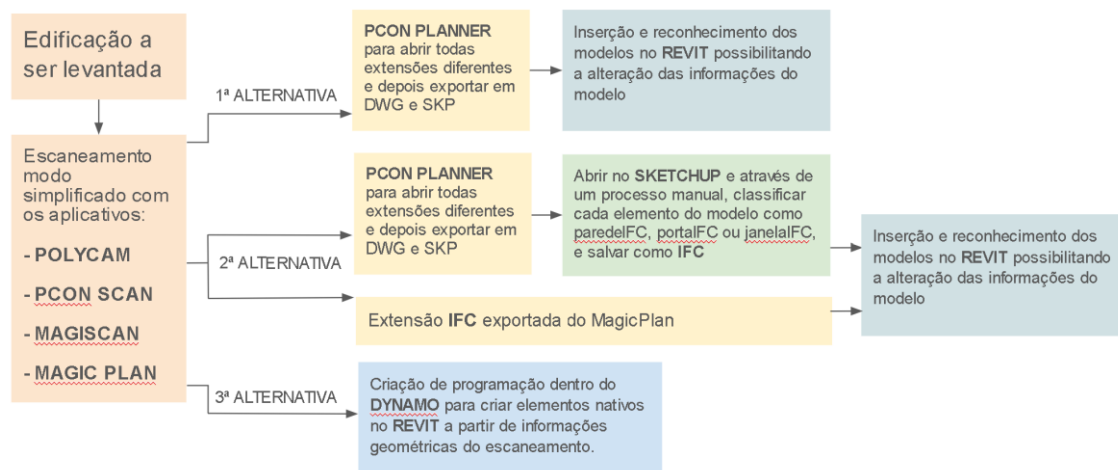


Figura 13: Fluxograma com as alternativas de processo desde o levantamento até o modelo pronto para a simulação dentro do *software Autodesk Revit*.

Fonte: Autora (2025).

O desenvolvimento do processo proposto foi estruturado a partir de três alternativas principais, como mostrado na Figura 13. Essas alternativas foram formuladas com base tanto na revisão de literatura sobre interoperabilidade entre softwares (Zeng et al., 2023; Kamel e Memari, 2019; Gao et al., 2019), quanto na análise crítica de ferramentas atualmente disponíveis. O objetivo é testar diferentes caminhos para viabilizar a inserção de modelos geométricos simplificados e paramétricos no ambiente BIM, com foco na etiquetagem de edificações construídas.

A primeira alternativa considera o uso do *pCon Planner* como plataforma intermediária, a partir da qual seria possível abrir os arquivos exportados pelos aplicativos de escaneamento e convertê-los para inserir no *Revit*. A escolha dessa hipótese deriva de observações práticas quanto ao potencial do *pCon Planner* para reconhecimento e possibilidade de leitura de vários formatos e posterior exportação. Ainda que, pela experiência prática com o *Autodesk Revit*,

fosse previsível que o processo não permitiria a geração de modelos paramétricos, essa limitação precisava ser testada e comprovada de forma sistemática.

A segunda alternativa propõe a inserção de arquivos IFC no *Revit*, formato amplamente reconhecido como padrão aberto de interoperabilidade entre softwares BIM (ISO 16739-1, 2024). A expectativa era verificar em que medida a exportação de modelos escaneados para IFC poderia viabilizar sua posterior utilização em simulações energéticas dentro de um ambiente BIM.

Por fim, a terceira alternativa propõe um nível mais avançado de automação, fundamentada em estudos que exploram a aplicação de programação visual e customizada em fluxos de modelagem (Sacks et al., 2020; Rahmani Asl et al., 2014). A alternativa consiste no desenvolvimento de rotinas no Dynamo, voltadas à geração de elementos nativos do Revit diretamente a partir das informações extraídas do modelo escaneado. Diferentemente das alternativas anteriores, essa abordagem busca eliminar a dependência de arquivos intermediários, permitindo maior controle sobre o processo e potencializando a eficiência na criação de modelos geométricos compatíveis com simulações de eficiência energética.

### **3.4. Avaliação do método proposto**

A etapa de avaliação do método proposto considera não apenas a verificação final da solução desenvolvida, mas também avaliações parciais ao longo de todo o processo, conforme orientado pela abordagem do DSR.

Segundo Lacerda et al. (2013), é essencial que o artefato construído seja submetido a procedimentos rigorosos que minimizem vieses e assegurem a confiabilidade dos resultados obtidos. Não basta desenvolver um artefato funcional, é necessário evidenciar sua efetividade prática na resolução de problemas concretos. A aplicação do método em estudos de caso, portanto, visa não apenas validar tecnicamente sua execução, mas também verificar se ele é, de fato, aplicável em diferentes cenários, reconhecendo eventuais limitações.

Nesta etapa, objetiva-se aplicar o processo de forma integrada, por meio de um estudo de caso em uma escala maior que os estudos feitos anteriormente, a fim de testar e validar a eficácia da solução desenvolvida. A aplicação prática permitiu avaliar o desempenho geral do processo, possibilitando ajustes e refinamentos sempre que necessário. Nos casos em que se identificaram falhas ou pontos críticos, foram realizadas iterações adicionais para ajustar e otimizar a solução.

A fase de avaliação estabeleceu critérios para determinar se a solução encontrada foi satisfatória para simulação de eficiência energética.

#### **3.4.1. Estudo comparativo entre método proposto e método convencional de levantamento e modelagem**

Apesar do crescente uso de dispositivos móveis com sensores LiDAR para escaneamento de ambientes, os estudos existentes concentram-se majoritariamente na análise de precisão e acurácia dos modos tradicionais de escaneamento, que geram nuvens de pontos detalhadas. Não foram encontrados trabalhos acadêmicos que avaliem de forma específica a precisão do modelo simplificado gerado pelo framework RoomPlan. A única avaliação identificada encontra-se no próprio site da Apple (Apple, 2022), que reporta taxas de precisão acima de 90% na detecção de paredes, portas e janelas para os milhares de experimentos conduzidos pela empresa.

Neste trabalho, no entanto, não se buscou reproduzir ou validar tais métricas, mas sim testar o processo completo proposto — desde o escaneamento até a geração de um modelo compatível com o BIM — a fim de verificar se as geometrias produzidas pelo RoomPlan são suficientemente adequadas para aplicações como a simulação de eficiência energética.

Para que fosse feita a comparação entre os dois métodos, foram realizados estudos em dois ambientes distintos. Em cada um deles foi realizado um levantamento manual, cujas medidas foram posteriormente digitalizadas manualmente no *software Autodesk Revit* para criar um modelo comparativo de referência. Com os dados coletados manualmente, se comparou com os escaneamentos feitos no mesmo local pelo aplicativo *pCon.scan*.



Considerando o objetivo deste trabalho e pensando no uso do processo proposto para fins de simulação de eficiência energética cumprindo os Requisitos de Avaliação da Conformidade (RAC) estabelecidos a partir do item 5.2.6 da Portaria Nº 309, de 6 de setembro de 2022, os valores de tolerância para comparação entre os modelos foram:

- Áreas úteis dos ambientes e áreas das zonas térmicas: 10%.
- Pé-direito: 5%.
- Área das aberturas: 5%.

Com isso, o primeiro momento da fase de avaliação do método consistiu nesse estudo comparativo entre o fluxo proposto e o método convencional de levantamento e modelagem, buscando avaliar o tempo despendido, a complexidade do processo e o número de pessoas envolvidas em cada abordagem. Para isso, foram utilizados dois ambientes: o mesmo recorte de apartamento previamente utilizado nas fases anteriores da pesquisa, e uma nova sala com volumetria igualmente simples, mas com características espaciais distintas.

A escolha por manter o ambiente inicial nos testes comparativos buscou garantir continuidade e controle sobre as variáveis do processo, permitindo a análise dos ganhos obtidos com a aplicação do novo método em um contexto já conhecido. A incorporação do segundo ambiente, por sua vez, ampliou a robustez da avaliação ao introduzir condições geométricas mais desafiadoras. A sala apresenta um ângulo acentuado em planta, grandes esquadrias posicionadas nas junções entre paredes e uma lareira, elementos que exigem maior precisão na captação das formas e na geração do modelo digital. A Figura 14 apresenta a volumetria desse ambiente.

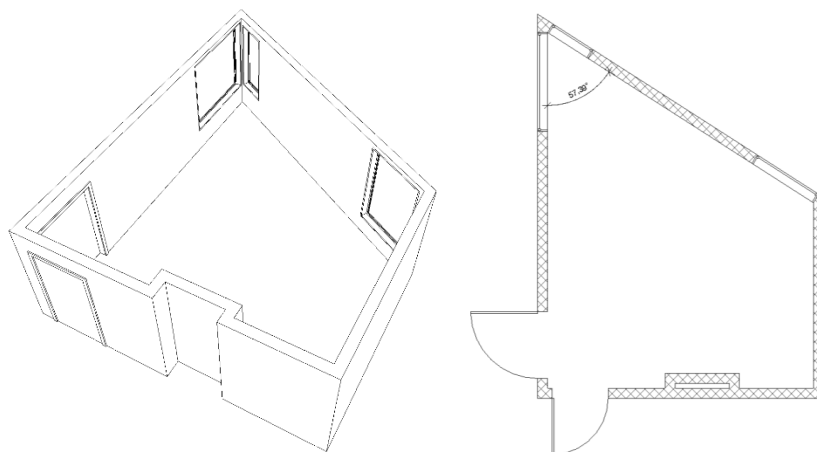


Figura 14: Sala utilizada para os testes comparativos do processo proposto com o processo convencional.

Fonte: Autora (2025).

O principal objetivo dos testes realizados nesse segundo ambiente foi verificar o desempenho dos aplicativos de escaneamento na detecção de ângulos não ortogonais e a interferência nas aberturas fora dos padrões usuais, além de avaliar o impacto desses fatores na geração automatizada da volumetria. A análise comparativa entre os dois métodos, realizada com base nesses dois ambientes, permitiu uma avaliação mais abrangente da aplicabilidade, das limitações e dos potenciais ganhos de produtividade associados ao novo fluxo proposto.

#### **3.4.2. Estudos geométricos de casos específicos**

O segundo momento da etapa de avaliação foi dedicado à análise de casos específicos, voltados à verificação dos limites da metodologia desenvolvida frente a geometrias complexas ou menos usuais. Esses testes adicionais tiveram como objetivo identificar restrições do processo de levantamento e modelagem automatizados, promovendo ajustes e consolidando a robustez e aplicabilidade do método proposto. Para cada situação analisada — como pé-direito duplo, desníveis entre ambientes, paredes curvas, ou volumes côncavos — foi selecionado um ambiente distinto, de forma que cada teste pudesse explorar de maneira isolada os desafios impostos por essas características geométricas.

A definição dos casos a serem testados baseou-se no trabalho de Rodrigues (2023), que se concentrou na etapa de simulação energética dentro do Autodesk Revit, utilizando o *System Analysis*. Em sua pesquisa, o autor partiu de uma lista elaborada pelo estudo de Xu (2021), contendo 18 cenários com os principais erros geométricos que dificultam a geração de modelos analíticos compatíveis com as simulações. Embora a pesquisa de Rodrigues tenha focado na etapa posterior à modelagem, seu estudo evidenciou que muitos dos obstáculos enfrentados durante a simulação energética têm origem na forma como a geometria do modelo é construída. Assim, o presente trabalho propõe-se a anteceder essa análise, voltando-se à fase anterior da cadeia produtiva: o levantamento e a geração automatizada da volumetria.

A partir dos 18 cenários estudados por Rodrigues (2023), foram selecionados aqueles que dizem respeito diretamente à geometria arquitetônica de ambientes internos e à forma como os elementos construtivos são representados: **meia parede; forros com alturas diferentes; átrio; janela interna; ambiente côncavo; pele de vidro; e parede curva**. Esses casos foram, então, utilizados como referência para compor os estudos adicionais da etapa de avaliação. Além desses sete casos, foram incluídos ainda: um cenário adicional que contempla o escaneamento de **múltiplos ambientes em sequência**, simulando uma situação prática recorrente em levantamentos reais de edificações; e um **ambiente com forro inclinado**, buscando entender as limitações deste método. Cada ambiente será apresentado individualmente ao longo da seção de resultados, com a descrição dos testes realizados e a análise dos comportamentos observados no processo de levantamento, modelagem e geração dos elementos arquitetônicos no Revit.

### 3.4.3. Estudo de caso para avaliação do processo

O objetivo dessa etapa foi avaliar a aplicabilidade do método em uma escala mais ampla, envolvendo múltiplos ambientes e níveis, como ocorre em situações reais de projeto. Com isso, a validação do método desenvolvido foi conduzida por meio de cinco etapas principais, que compreendem desde o planejamento até a execução da simulação energética, conforme mostra a Figura 15. A

primeira etapa, o planejamento, envolve o primeiro contato com o objeto de estudo, momento em que se avalia a pertinência do uso do método proposto em relação aos métodos tradicionais de levantamento. Nessa fase, define-se o objetivo específico do levantamento, bem como a organização da coleta de dados, considerando as condições do local e os recursos disponíveis.

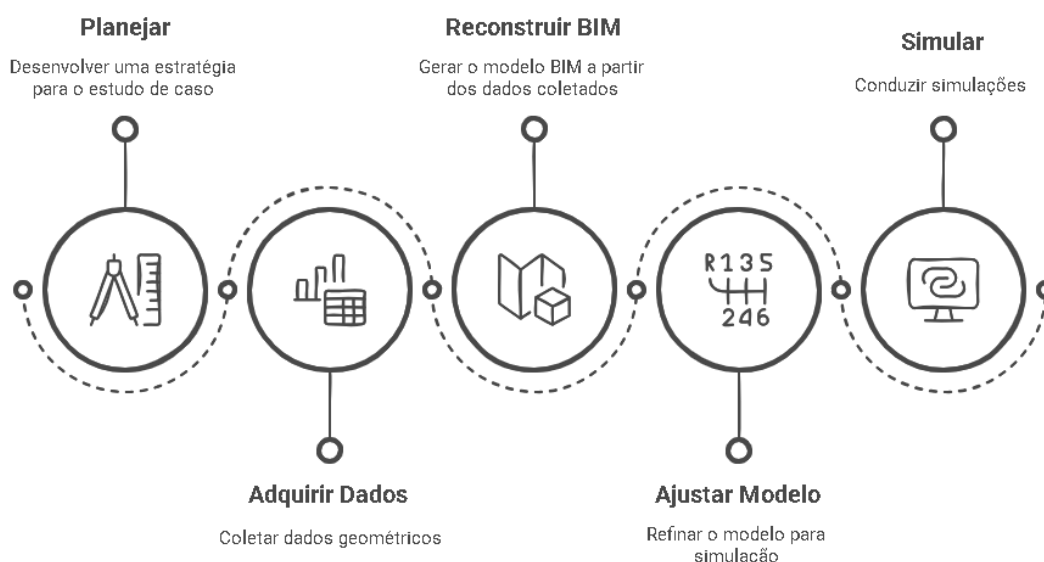


Figura 15: Etapas para análise do estudo de caso.

Fonte: Autora (2025).

A segunda etapa, a aquisição de dados, consiste na realização do escaneamento dos ambientes utilizando dispositivos móveis com sensor LiDAR. Após a varredura inicial, realiza-se uma verificação da geometria gerada, repetindo-se a coleta caso necessário. Complementarmente, fotos e vídeos são registrados para servir como documentação auxiliar e permitir comparações posteriores com os dados obtidos. A terceira etapa consiste na reconstrução do modelo BIM a partir dos dados obtidos no escaneamento. Essa fase envolve a organização e o processamento das informações espaciais captadas, com o objetivo de gerar, por meio de recursos automatizados, os elementos arquitetônicos tridimensionais compatíveis com a plataforma BIM.

Na quarta etapa, realizam-se os ajustes necessários para refinar o modelo gerado. Isso inclui ações como a revisão e o aperfeiçoamento da geometria, a complementação de elementos eventualmente não representados e a

preparação do modelo para etapas posteriores de análise, garantindo sua conformidade com os requisitos da simulação energética. Por fim, a quinta etapa, de simulação, prepara o modelo para análise de desempenho. São inseridas as informações necessárias para a simulação energética, como materiais e condições de uso, seguido da geração do modelo analítico e da execução da simulação no *Revit*. Essa etapa final permite avaliar o desempenho do modelo gerado e, conseqüentemente, a eficácia do método proposto.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Aplicativos para escaneamento com LiDAR

Existem vários aplicativos desenvolvidos com a finalidade de escaneamento e geração de modelos 3D que utilizam o LiDAR. No Quadro 4, estão os aplicativos que foram avaliados com seus diversos modos, que serão aprofundados no decorrer do trabalho.

Aplicativo	Modos de escaneamento 3D de ambientes	Formatos de exportação do modelo 3D na versão gratuita	Preço da versão paga
<b>PolyCam</b>	LiDAR, Floorplan*, Space	GLTF	R\$149,90/mês
<b>PCon Scan</b>	Simplified 3D scans*	<i>EOX, USDZ</i>	Gratuito
<b>3D Scanner App</b>	LiDAR, Advanced, Point Cloud, Photos	GLTF, <i>GLB</i> , DAE, FBX, OBJ, STL	Gratuito
<b>MagiScan</b>	Forma Livre, Híbrido, Plano do cômodo*	<i>USDZ</i>	R\$69,90/mês
<b>Canvas</b>	LiDAR	-	Por m <sup>2</sup>
<b>Scaniverse</b>	LiDAR	FBX, OBJ, <i>GLB, USDZ</i> , STL, PLY, LAS	Gratuito
<b>Kiri Engine</b>	Photo, LiDAR	<i>USDZ</i>	R\$99,90/mês
<b>Abound</b>	Photo, LiDAR	<i>USDZ</i>	R\$79,90/mês
<b>MagicPlan</b>	Automático*, manual*	<i>USDZ, OBJ</i>	R\$10,90/mês

\*Modo que utiliza o Framework RoomPlan da Apple.

Quadro 4: Características dos aplicativos de escaneamento (atualizado Maio de 2025).

Fonte: Autora (2025).

A comparação entre os aplicativos de escaneamento testados, mostrado no Quadro 4, revelou diferenças principalmente em termos de modos de uso, formatos de exportação e custo das versões pagas. Os modos de uso variam entre as opções de escaneamento com o uso do LiDAR, da Fotogrametria ou do

modo RoomPlan (que também utiliza o sensor LiDAR) para geração de modelo geométrico. Cada um deles oferecendo diferentes níveis de detalhe e tipos de captura para atender à diversas necessidades de levantamento digital. No que diz respeito aos formatos de exportação disponíveis, observou-se uma variedade de opções, embora alguns aplicativos limitem os formatos mais avançados a assinaturas pagas. Entretanto, ao analisar os formatos de exportação oferecidos pelas versões pagas dos aplicativos baseados no *RoomPlan*, não foi identificado nenhum diferencial relevante em relação à integração com o BIM. Embora algumas versões permitam a exportação em formatos adicionais, tais como *.usdz* ou *.gltf*, essas opções não demonstraram potencial para facilitar o processamento das informações dentro do fluxo proposto neste trabalho.

Apesar da variação de nomenclaturas, os três principais modos de levantamento se baseiam em:

- Uso da Fotogrametria: extrai as informações tridimensionais de fotografias, através de várias fotos que são processadas para gerar um modelo. Segundo informações dentro do aplicativo *Polycam*, sua precisão funciona melhor para objetos do que para ambientes.
- Uso do LiDAR: gera um modelo 3D realista com as texturas de cada ponto, a partir de uma ‘filmagem’ circulando pelo ambiente. É muito detalhada e seu processamento é bem rápido. Esse modo é ideal para registrar ambientes como fachadas históricas ou captar a diferença de níveis de uma calçada. A Figura 16 (A) mostra um exemplo de modelagem já processada dentro do aplicativo, utilizando esse modo no *Polycam*. Sua integração com *softwares* BIM acontece por meio de Nuvem de Pontos;
- Geração de modelo geométrico: Também utiliza o sensor LiDAR para captar as informações do ambiente, mas possibilita um modelo digital onde podem ser visualizados os dados com mais facilidade, não apenas por meio de uma documentação do existente. A Figura 16 (B) exemplifica o mesmo ambiente da (A), também no aplicativo *Polycam*, porém no modo “Room”, como o aplicativo chama o modo que utiliza o *RoomPlan*.

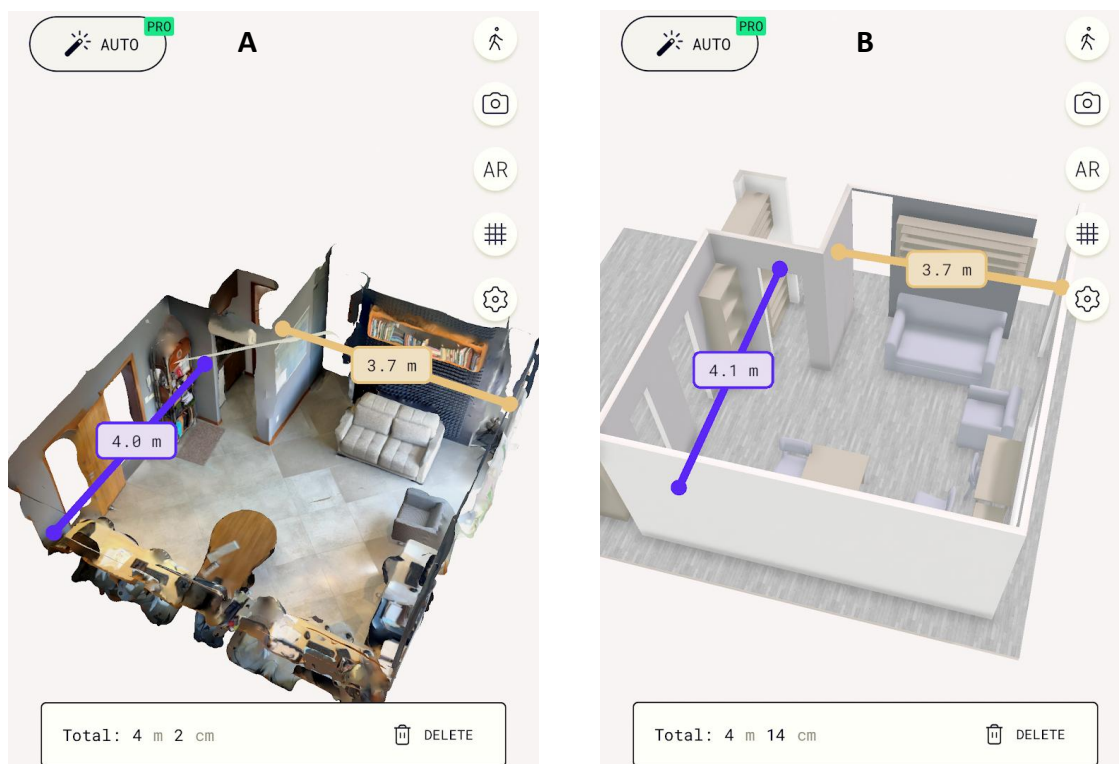


Figura 16: Modo LiDAR (A). Modo Room (B).

Fonte: Autora (2024).

Baseando-se na revisão de literatura e nos testes preliminares realizados, optou-se por utilizar o modo RoomPlan de escaneamento. Este modo foi escolhido por sua capacidade de gerar modelos geométricos diretamente a partir do levantamento realizado, facilitando a categorização de elementos construtivos e apresentando maior potencial de compatibilidade e reconhecimento com o ambiente BIM. Como dito anteriormente, cada aplicativo tem seu nome específico para os diferentes modos, mas o modo RoomPlan de cada aplicativo está sinalizado no Quadro 4. Sendo assim, entre os aplicativos testados, este modo de escaneamento foi possibilitado através de quatro aplicativos, sendo eles: *Polycam*, *pCon.scan*, *Magiscan* e *MagicPlan*.

Quando há necessidade de um modelo com maior nível de detalhamento ou com diferenças de níveis, é possível utilizar o modo que utiliza o LiDAR sem automatizar essa geração volumétrica, apresentando assim, uma margem de imprecisão de apenas 5 mm na captura dos dados, segundo Moyano et al. (2023).



Diante do objetivo proposto neste trabalho, optou-se pelo uso do modo RoomPlan de geração de geometria, uma abordagem mais recente em comparação aos métodos tradicionais baseados em nuvem de pontos. Esse modo se baseia no *framework RoomPlan*, lançado pela Apple® em 2022, o que pode explicar sua ainda limitada presença na literatura acadêmica e sua disponibilidade restrita a alguns aplicativos que já incorporam as funcionalidades mais atuais do ecossistema Apple® (APPLE, 2022).

#### **4.2 Funcionamento do *RoomPlan***

Atualmente, apenas os dispositivos móveis da Apple® — nas versões Pro dos iPhones e iPads lançados a partir de 2020 — contam com sensores LiDAR integrados (Cuperschmid et al., 2024). A partir dessa tecnologia, a Apple® desenvolveu em 2022 o *RoomPlan*, uma interface de Programação de Aplicativos (API) que possibilita a criação automatizada de modelos 3D de ambientes internos. Essa funcionalidade combina a câmera e o sensor LiDAR, com modelos de aprendizado de máquina (ML), o ARKit e o RealityKit — framework de realidade aumentada da empresa — para identificar elementos arquitetônicos e mobiliários e permitir o rastreamento espacial e a interpretação geométrica da cena em tempo real (Apple, 2022).

Em vez de gerar uma nuvem de pontos densa e bruta, como ocorre em escaneamentos tradicionais, o *RoomPlan* interpreta os dados captados pela câmera e pelo sensor LiDAR para reconstruir o ambiente em tempo real com base em geometrias vetoriais simplificadas, como planos e volumes tridimensionais. Esse processo permite o reconhecimento semântico de paredes, portas, janelas e móveis, que são então organizados em um modelo 3D estruturado e exportável em formatos *USDZ* ou *JSON*. A abordagem oferece maior eficiência e leveza na representação espacial, sendo especialmente adequada para aplicações em realidade aumentada e modelagem 3D.

Sendo assim, o LiDAR detecta uma superfície vertical contínua a X metros da câmera, o ML classifica essa superfície como “parede” e o algoritmo ajusta como um plano retangular vertical alinhado ao chão. Se houver uma abertura no meio com profundidade diferente, o modelo detecta uma “janela” ou “porta”.

O *RoomPlan*, assim como outras funcionalidades baseadas em ARKit e sensores LiDAR, pode ser incorporado em diferentes aplicativos com finalidades variadas. Para iniciar uma captura, o aplicativo apresenta uma visualização (*RoomCaptureView*) através da qual o usuário visualiza seu ambiente em realidade aumentada. A visualização exibe indicações virtuais conforme o usuário se movimenta pelo ambiente, sobreposições gráficas em tempo real são exibidas sobre as estruturas físicas para indicar o progresso da digitalização, conforme mostra a Figura 17. Se a estrutura exigir um tipo específico de movimento ou perspectiva do dispositivo para concluir a captura, a interface do usuário exibe instruções que explicam como posicionar o dispositivo. Deve-se iniciar o escaneamento preferencialmente por uma junção entre duas paredes e o piso, movendo para cima até encontrar o teto (APPLE, 2022).

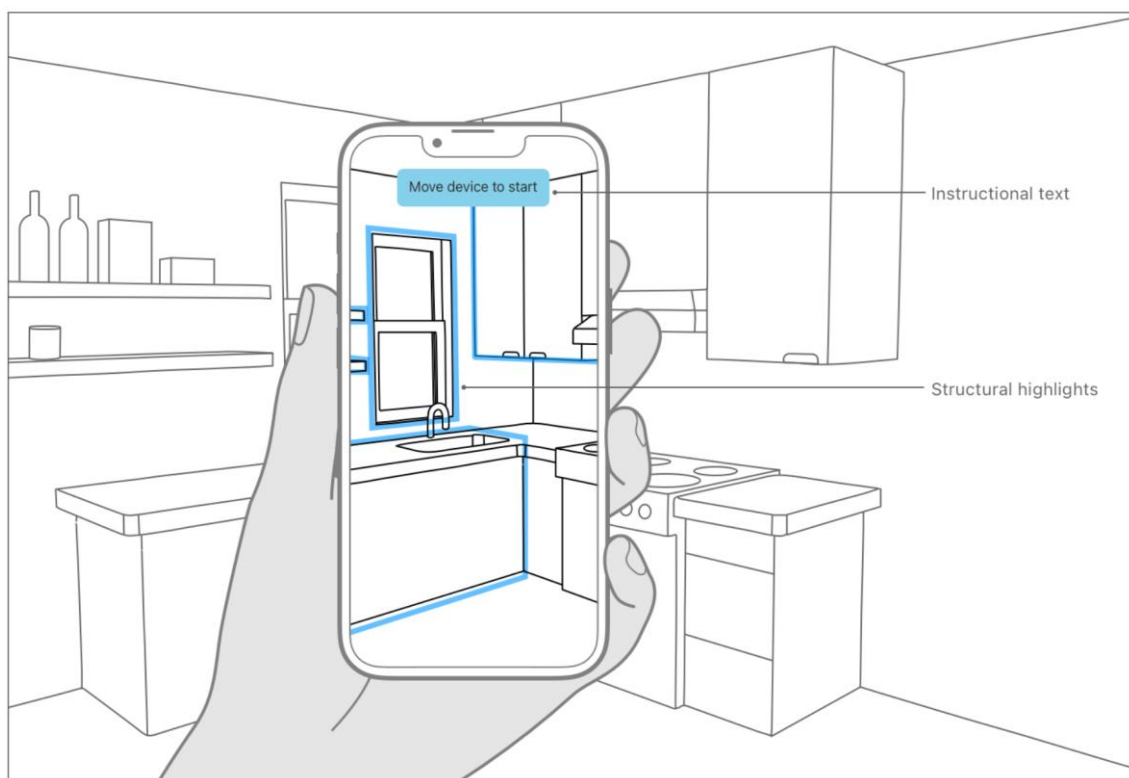


Figura 17: Interface de visualização do escaneamento com *RoomPlan*.

Fonte: <https://developer.apple.com/documentation/roomplan/>.

Ao perceber que o reconhecimento desse canto foi efetuado, deve-se percorrer o ambiente focando sempre nas junções entre piso e parede ou parede e teto. Após o reconhecimento de todos os elementos do ambiente, se finaliza o

escaneamento para que ele processe e forme o modelo 3D. Em casos em que algum elemento não é reconhecido diretamente, o ideal é que se repita o processo, começando do zero o escaneamento.

A Figura 18 mostra a tela do celular durante um escaneamento executado por esse modo no aplicativo *Polycam*. Nela é possível perceber o contorno que fica em torno das geometrias que já foram reconhecidas, e uma representação do modelo 3D que é gerado simultaneamente para que seja possível identificar quais elementos ainda não foram captados no ambiente.



Figura 18: Tela do aplicativo *Polycam* durante o escaneamento com *RoomPlan*.

Fonte: Autora (2025).

São feitas algumas recomendações visando otimizar o uso dessas tecnologias, conforme exemplo do aplicativo *MagicPlan*, mostrado na Figura 19. É importante fechar as portas dos cômodos que não serão incluídos no escaneamento para garantir que a digitalização não capture salas adjacentes ao mesmo tempo, evitando assim interferências e sobreposições indesejadas nos dados coletados. Além disso, é aconselhável realizar a digitalização em condições de iluminação adequadas (mínimo de 50 lux) e evitar movimentações rápidas do dispositivo durante o escaneamento, assegurando que todos os elementos estruturais

sejam capturados com maior precisão. Para propriedades com plantas abertas ou paredes de vidro, é recomendado o uso da Digitalização Manual oferecidas por alguns aplicativos. Algumas vezes, elementos como portas e janelas podem demorar a ser reconhecidos; caso isso ocorra, o ideal é repetir o escaneamento para garantir que todos os detalhes sejam corretamente capturados.

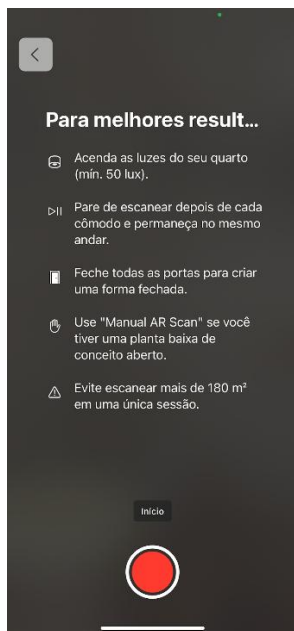


Figura 19: Recomendações para bons resultados dos escaneamentos pelos aplicativos.

Fonte: Captura de tela feita pela autora do aplicativo MagicPlan (2025).

Outra informação importante é a restrição para escaneamento de ambientes muito extensos, identificada durante o uso dos aplicativos. Não é aconselhado escaneamentos contínuos de espaços com mais de 180m², de acordo com informações dos próprios aplicativos conforme mostra a Figura 19, sendo ideal para esses casos, capturar a geometria em mais de uma medição, dividindo o ambiente (MagicPlan, 2025). O aplicativo MagicPlan permite fazer mais de um escaneamento dentro do mesmo "modelo". Isso se torna especialmente vantajoso pois, assim, não se perde o sistema de coordenadas entre os ambientes e é possível reconhecer a posição dos ambientes sem a necessidade que sejam escaneados todos os ambientes em um mesmo momento.

### 4.3 Testes das alternativas de processo

Apesar do modo de escaneamento baseado no *RoomPlan* resultar em um modelo 3D com os elementos arquitetônicos categorizados, pôde-se verificar que a maioria das extensões dos aplicativos não abrem diretamente em um ambiente BIM. Essa limitação evidencia a necessidade de desenvolver métodos e ferramentas que facilitem a integração direta desses modelos 3D com os ambientes BIM, promovendo uma transição mais eficiente entre o levantamento inicial e a análise energética em um modelo BIM.

A construção do processo foi conduzida por meio de testes iterativos, com o objetivo de responder à pergunta de pesquisa e propor uma solução viável para transformar os dados coletados por sensores a laser em um modelo BIM adequado para simulação de eficiência energética, de forma automatizada e eficiente. A partir da etapa de exploração do conhecimento, definiu-se o uso do *framework RoomPlan*, desenvolvido pela Apple®, como ponto de partida do método de levantamento. Com isso, o desafio passou a ser o de desenvolver um fluxo que permitisse converter os dados gerados por esse framework em um modelo geométrico nativo no *Revit*, preparado para simulações energéticas.

Para viabilizar essa integração, foram elaboradas e testadas diferentes hipóteses metodológicas, cada uma explorando caminhos alternativos para transformar os dados obtidos no levantamento em geometrias reconhecíveis e manipuláveis no ambiente BIM. Esses testes permitiram avaliar não apenas a viabilidade técnica de cada hipótese, mas também seu grau de automatização, a fidelidade geométrica resultante e sua compatibilidade com os requisitos do processo de etiquetagem energética de edificações existentes.

#### 4.3.1. Alternativa 1

Aplicativo de escaneamento → Conversão de formato (software intermediário)  
→ Abertura no *Revit* → Inserção das informações no modelo.

Na Hipótese 1, o objetivo foi importar para o *Revit* as geometrias geradas por diferentes aplicativos baseados no framework *RoomPlan*, com o intuito de visualizar como os elementos escaneados seriam reconhecidos no ambiente BIM. Todos os arquivos gerados pelos aplicativos puderam ser abertos e

visualizados no *pCon Planner*, um *software* de uso gratuito selecionado como plataforma intermediária para converter os arquivos nos formatos *SKP* ou *DWG*, compatíveis com o ambiente BIM.

O processo foi repetido para os arquivos obtidos dos quatro aplicativos que ofereciam a funcionalidade de geração de geometria, sendo eles: *PolyCam* (arquivo *.glb*), *pCon.scan* (arquivo *.eox*), *MagiScan* (arquivo *.usdz*) e *MagicPlan* (arquivo *.usdz*). Assim, obtivemos um total de quatro arquivos no formato *DWG* e quatro no formato *SKP*, todos os quais foram importados diretamente no *software Autodesk Revit* para posterior análise das possibilidades de integração dentro do contexto do projeto BIM.

Observaram-se algumas disparidades entre os modelos de cada aplicativo importados no *Revit*:

- **Magiscan:** Os primeiros arquivos importados para o *Revit* dessa maneira, demonstraram incerteza da geometria, o escaneamento que gerou esses arquivos foi feito em Janeiro de 2024. O *DWG* importado apresentou um plano diagonal no meio do modelo, causando confusão em algumas informações. O *SKP* importado exibiu planos triangulados, mas com a geometria correta. As paredes não possuíam espessura, sendo representadas apenas por um plano.

Em fevereiro de 2025, foram feitos outros dois escaneamentos do mesmo local. Eles se mostraram mais precisos e vieram com a geometria correta para o *Revit*, com valores idênticos nos dois modelos. Com isso, por ter tido problemas apenas com o primeiro levantamento feito um ano antes, e os outros dois terem se mostrado adequados, se decidiu realizar um quarto levantamento, para ver se havia ajustes mais atuais no aplicativo, que mostrariam maior confiabilidade. O último pareceu correto até sua importação no *Autodesk Revit*, onde a geometria veio totalmente desordenada, com os elementos em posições aleatórias. Portanto, apesar de ser um aplicativo com um bom funcionamento, por sua instabilidade ao ser importado no *software BIM*, ele foi descartado como opção. A Figura 20 ilustra os cinco arquivos descritos acima e como eles apareceram no *Autodesk Revit*. Importante ressaltar que todos estão na mesma escala e que os processos de escaneamento e de importação de cada modelo foram feitos da mesma maneira.

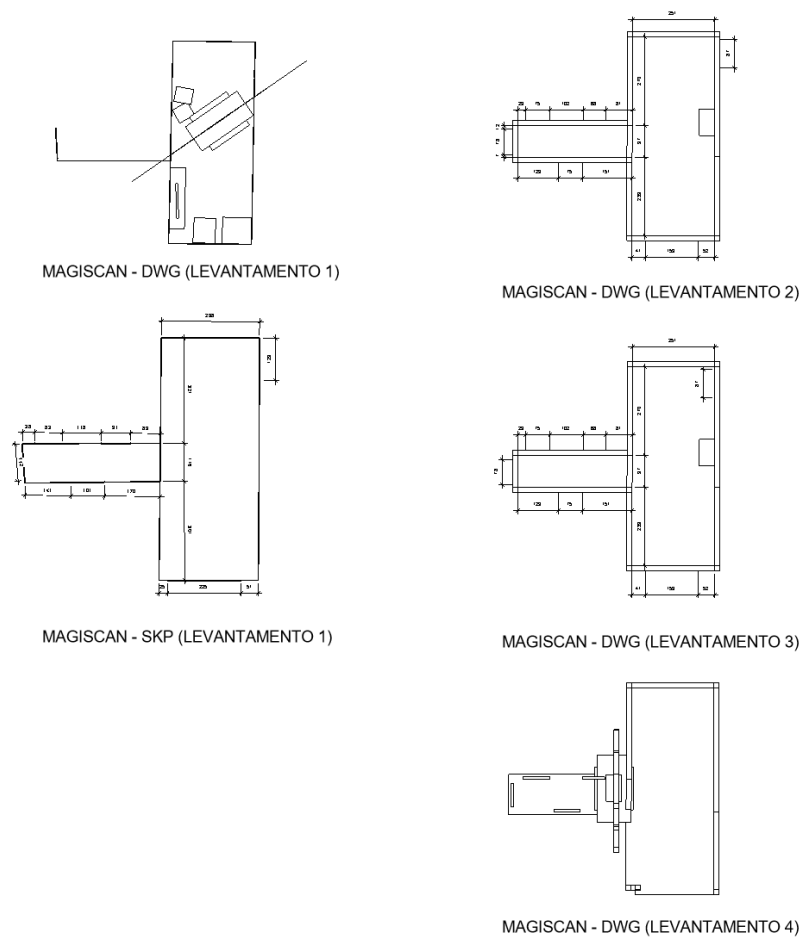


Figura 20: Importação no *Revit* dos arquivos *USDZ* do *Magiscan* convertidos em *DWG* ou *SKP*.  
Fonte: Autora (2025).

- **PCon.Scan:** Tanto o *DWG* quanto o *SKP* importados apresentaram-se corretos e com a geometria precisa, porém o *SKP* apresentou planos triangulados (Figura 21- A). As paredes possuem espessura e, ao serem selecionadas, demonstram ser um único elemento, por aparecer selecionado todo o volume da parede (Figura 21- B).

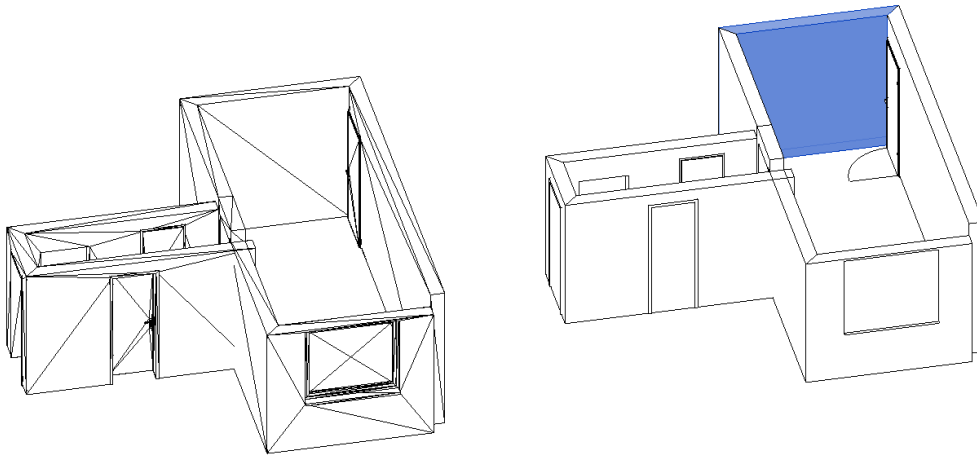


Figura 21: SKP (A) e DWG (B) gerados a partir do EOX do pCon.Scan e importados no Revit.  
Fonte: Autora (2025).

- **Polycam:** O arquivo *DWG* apresentou-se limpo e correto e o *SKP* exibiu planos triangulados, embora a geometria estivesse correta (Figura 22- A). As paredes possuem espessura, porém ao serem selecionadas, apenas uma face é selecionada, não todo o volume da parede, como demonstra a Figura 22 (B).

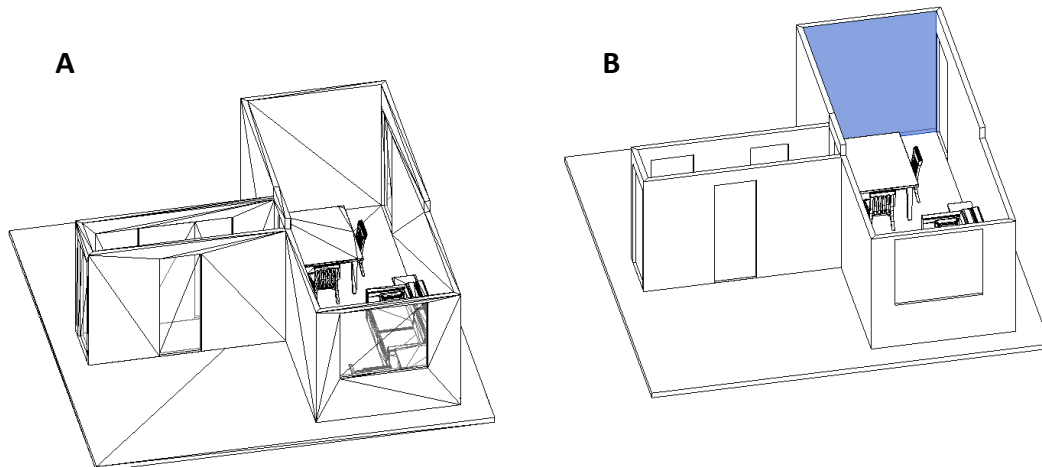


Figura 22: SKP (A) e DWG (B) gerados a partir do GLTF do Polycam e importados no Revit.  
Fonte: Autora (2025).

- **MagicPlan:** O *DWG* e o *SKP* gerados a partir do arquivo *USDZ* criado em julho de 2024 causaram confusão nas informações, vindo distorcidos para o *Revit* (Figura 23). Esse formato de exportação por esse aplicativo, foi então



descartado, o outro formato de exportação neste momento pelo *MagicPlan*, era o IFC, que foi testado na hipótese 2.

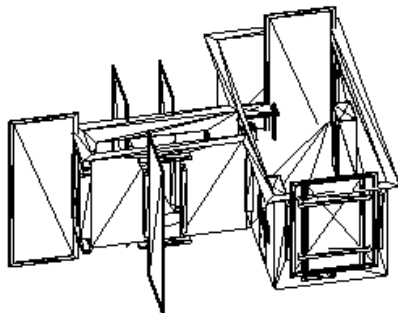


Figura 23: *SKP* gerado a partir do *USDZ* do *MagicPlan* e importado no *Revit*.

Fonte: Autora (2025).

Analisando então todos os modelos importados no *Revit*, percebeu-se que mesmo os casos que vieram com a geometria correta para o ambiente BIM, apesar de viabilizarem a visualização da volumetria, resultaram em modelos compostos por geometrias inertes, sem a inteligência paramétrica dos elementos nativos do BIM, o que inviabiliza sua utilização direta em processos como a simulação de desempenho energético.

Como não era possível substituir diretamente essas geometrias por elementos nativos, a análise se concentrou em entender as particularidades de cada modelo, com a intenção de encontrar indícios que pudessem facilitar uma abordagem alternativa. Foram observadas diferenças significativas: em um caso, as paredes eram representadas como planos sem espessura; em alguns, tinham espessura, mas apenas um plano era selecionável; e em outros, a parede era reconhecida como um volume completo. A identificação dessas variações foi realizada com o intuito de explorar, nas hipóteses seguintes, especialmente na Hipótese 3, a viabilidade de reconhecer e substituir essas volumetrias por meio de programação visual no *Dynamo*, embora ainda não houvesse certeza se isso seria tecnicamente viável.

#### 4.3.2. Alternativa 2

Aplicativo de escaneamento → Formato IFC → Abertura no *Revit* → Inserção das informações no modelo.

A utilização do formato IFC como meio de importação do modelo escaneado para o ambiente *Revit* foi considerada uma hipótese promissora por se tratar de um padrão aberto e amplamente adotado para interoperabilidade entre diferentes plataformas BIM. O IFC permite representar não apenas a geometria dos elementos, mas também suas propriedades e classificações construtivas, o que o torna um caminho potencial para converter a volumetria escaneada em objetos BIM reconhecíveis por softwares como o *Revit*.

Além das importações nos formatos *DWG* e *SKP*, foi testada também a importação direta de um modelo no formato IFC, gerado pelo aplicativo *MagicPlan*. Conforme ilustrado na Figura 24, ao inserir esse modelo no *Revit* e selecionar elementos como portas (A) e janelas (B), observa-se que eles estão classificados como 'modelo genérico', embora os parâmetros IFC indiquem que se trata de aberturas. Já as paredes (C) são, de fato, reconhecidas como pertencentes à categoria 'parede'; no entanto, não é possível substituí-las por paredes nativas do *Revit*, o que impede a edição de suas camadas e limita o uso pleno dos recursos da modelagem BIM na plataforma. Nos testes feitos no ano de 2025 percebeu-se uma mudança nos formatos de exportação do *MagicPlan*, sendo possível apenas *USDZ* ou *OBJ*. A nova opção de formato (*OBJ*) foi testada da mesma forma, apresentando os mesmos problemas da impossibilidade de categorizar os elementos como nativos do *Revit*.

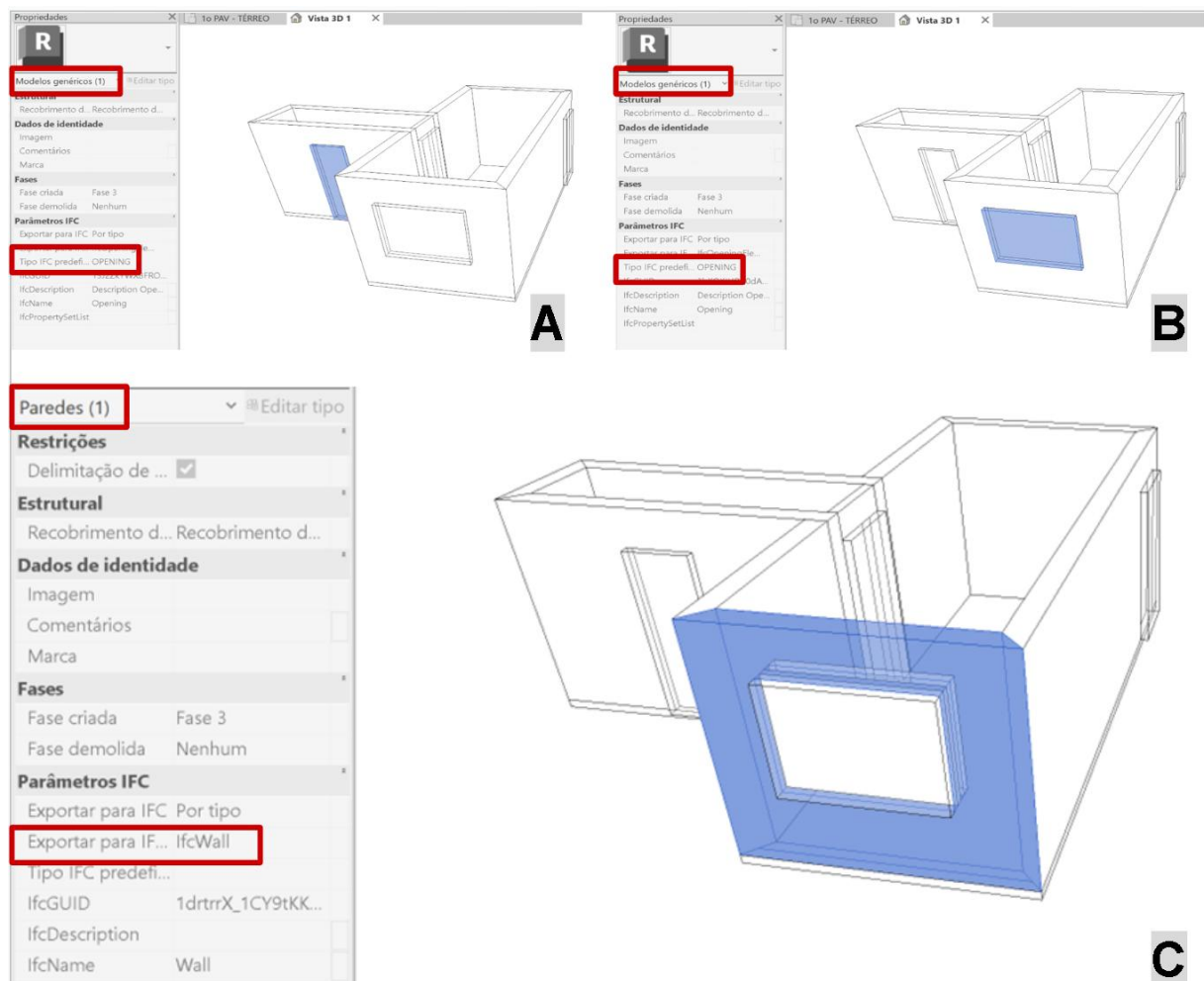


Figura 24: Modelo IFC vinculado no Revit.

Fonte: Autora (2024).

Antes do início dos testes com o uso da programação visual, foi explorada uma alternativa baseada na conversão de arquivos *SKP* para o formato IFC. Para isso, um dos modelos foi aberto no *software SketchUp*, e seus elementos foram manualmente classificados como *IfcWall*, *IfcDoor* ou *IfcWindow*, conforme sua tipologia. A Figura 25 ilustra esse processo, destacando a seleção de uma parede no *SketchUp* já categorizada como *IfcWall*, evidenciada pelo contorno tracejado em vermelho.

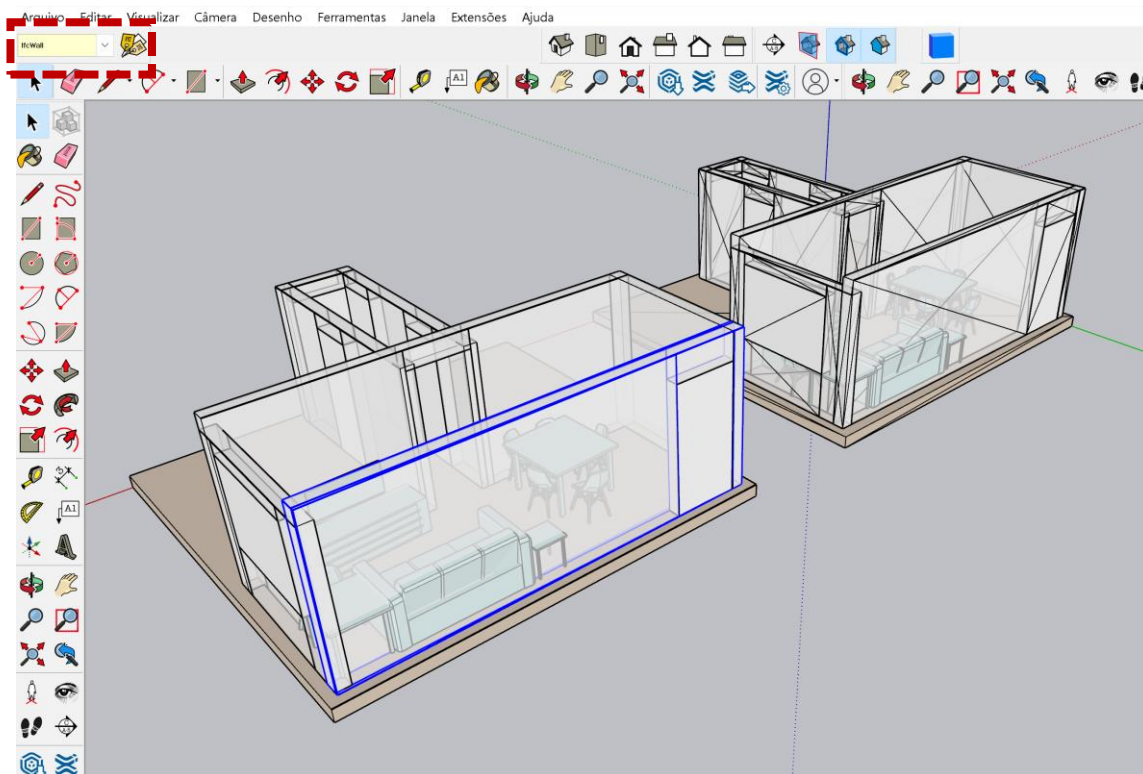


Figura 25: Modelo no *Sketchup* com as classificações dos elementos no formato IFC.

Fonte: Autora (2025).

Em seguida, o modelo foi exportado em formato IFC e importado no Autodesk Revit. Embora os elementos tenham sido reconhecidos como *PortalIFC* (A), *JanelaIFC* (B) e *ParedelFC* (C), conforme mostra a Figura 26, não foi possível convertê-los em elementos nativos do Revit. Esse comportamento foi semelhante ao observado no teste com o arquivo IFC gerado pelo aplicativo *MagicPlan*.

Essa limitação decorre da própria natureza do formato IFC, que tem como objetivo principal a interoperabilidade entre plataformas, garantindo a troca de informações em um nível genérico, mas não a edição paramétrica completa dentro de um software específico. Assim, ao serem importados, os objetos mantêm sua geometria, mas não assumem automaticamente as características de elementos nativos do Revit, o que inviabiliza a atribuição de propriedades necessárias para análises de eficiência energética diretamente no ambiente BIM.

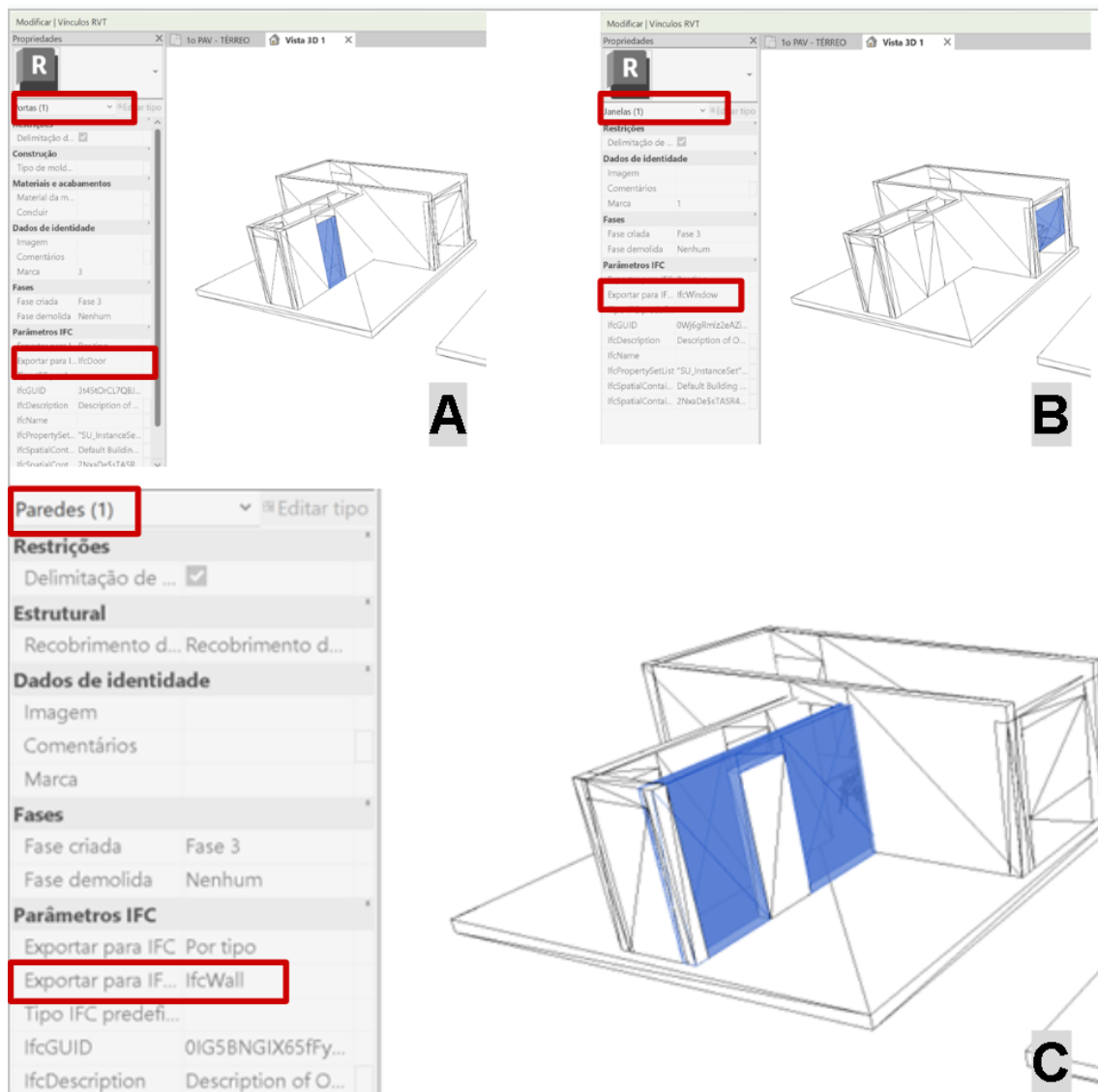


Figura 26: PortalIFC (A), JanelaIFC (B) e ParedeIFC (C) selecionados no *Revit*.

Fonte: Autora (2025).

#### 4.3.3. Alternativa 3

Aplicativo de escaneamento → Reconhecimento da geometria pelo Dynamo → Criação de modelo nativo do *Revit*.

Diante da limitação das hipóteses anteriores em permitir a substituição direta das geometrias importadas por elementos nativos do *Revit*, buscou-se uma solução através da utilização do *Dynamo*, ferramenta de programação visual integrada ao *Autodesk Revit*, para transformar a geometria gerada pelos aplicativos de escaneamento em elementos nativos, compatíveis com os requisitos para a

criação do modelo analítico de forma correta. Ou seja, a proposta foi automatizar a conversão das formas existentes, preservando sua configuração espacial e convertendo-as em componentes reconhecíveis pelo ambiente BIM, de modo a viabilizar a simulação de eficiência energética.

Foram testados rotinas e códigos que tentavam ler a geometria diretamente dentro do ambiente de modelagem do *Revit* e reconstruí-la com base nas informações espaciais dos arquivos importados. No entanto, essas tentativas não obtiveram sucesso na geração de objetos paramétricos.

O avanço ocorreu quando se identificou que um dos aplicativos utilizados no levantamento (*pCon.scan*) permitia exportar um arquivo de texto contendo as instruções que descrevem a geração da geometria. Em vez de tentar interpretar a geometria já formada, a proposta passou a ser interpretar diretamente esse código. Com base nisso, foi desenvolvida uma rotina em *Python*, integrada ao *Dynamo*, capaz de ler essas instruções e gerar elementos construtivos diretamente como objetos nativos do *Revit*. Essa mudança de abordagem aproximou o fluxo de trabalho da automação desejada, permitindo maior controle sobre o modelo gerado e atendendo aos requisitos necessários para a simulação de eficiência energética.

O *pCon.scan*, utilizado no processo, exporta os levantamentos em um arquivo com extensão *.eox*, que se trata, na verdade, de um pacote de arquivos de texto compactado. Ao descompactar esse arquivo, são obtidos quatro arquivos no formato *XML (Extensible Markup Language)*: *meta*, *objects*, *programs* e *structure*. Dentre eles, identificou-se que o arquivo *structure.xml* contém a descrição detalhada dos elementos escaneados, organizada em forma de código estruturado. Esse arquivo foi, então, utilizado como base para o desenvolvimento de uma rotina no *Dynamo*, capaz de processar seu conteúdo com um *script* em *Python*. A partir dessa interpretação, foram gerados no *Revit* os elementos construtivos como objetos nativos, permitindo a criação automatizada de um modelo compatível com simulações de eficiência energética.

Foram realizados testes iterativos até o sucesso do processo e verificações em diferentes casos para validar a integração, garantindo que os modelos estarão com a geometria correta. Com isso, a ferramenta de preferência por sua maior

facilidade de integração com o *Autodesk Revit* até o momento, é o *pCon.scan*, aplicativo gratuito. Apesar da simplicidade do aplicativo, com a inexistência de alguns recursos facilitadores presentes nos outros aplicativos, o principal é alcançado com o seu modelo: a integração com o BIM.

#### **4.4 Funcionamento da programação visual**

Para essa etapa, a parte de programação contou com o auxílio do mestrando na pós-graduação da Ciência da Computação na Universidade Federal de Pelotas (UFPEL), Pedro Thiago Roque. Além do código *Python* que é inserido na rotina criada no *Dynamo*, ela também conta com entradas específicas que permitem ao usuário selecionar os tipos de elementos que serão utilizados na modelagem. Para as paredes, portas e janelas, o usuário define quais famílias e tipos previamente carregados no projeto ou *template* do *Revit* deverão ser atribuídos a cada elemento gerado. Essas entradas são fundamentais para garantir a compatibilidade do modelo com os requisitos do BIM e permitir a correta criação do modelo analítico posteriormente. Além disso, há também uma entrada para definição do nível do projeto, que determina o plano de referência onde os elementos serão posicionados no ambiente tridimensional. Com isso, o script automatiza a criação dos elementos construtivos no *Revit* respeitando tanto os parâmetros definidos pelo usuário quanto os dados espaciais obtidos no levantamento, garantindo coerência e integração no processo. A Figura 27 mostra a programação visual desenvolvida para o trabalho a partir do *Dynamo*.

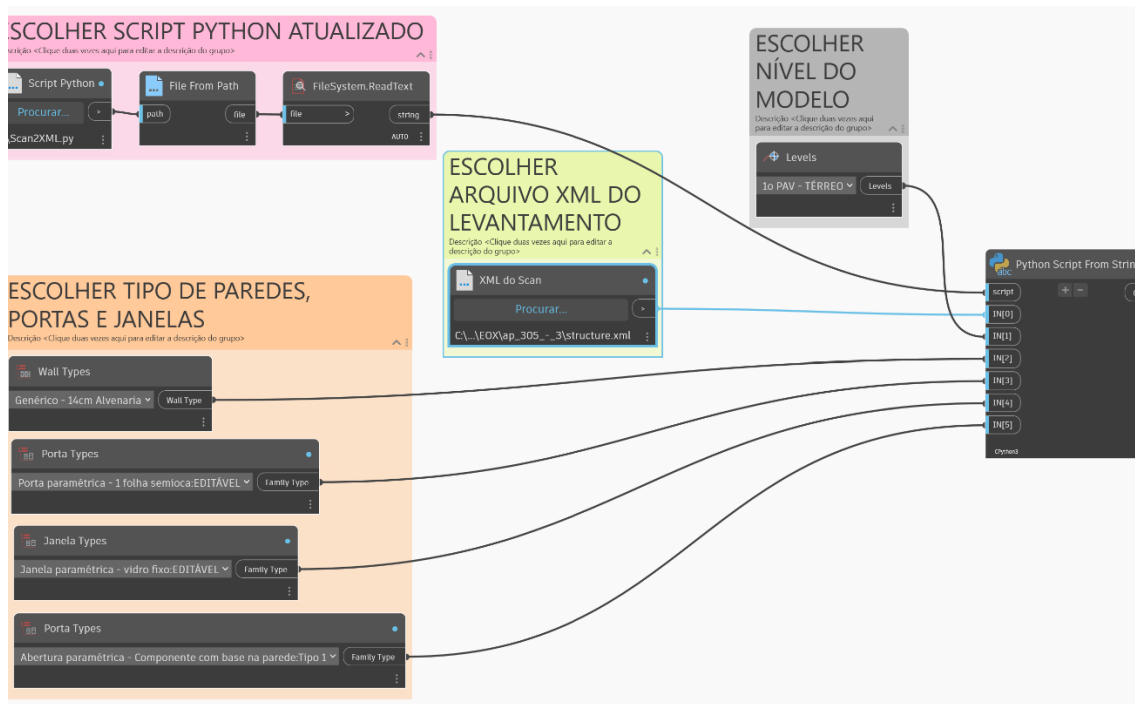


Figura 27: Programação visual em *Dynamo* para converter representações de *scan* 3D em geometria nativa do *Revit* usando *Python*.

Fonte: Autora (2025).

## Processo de implementação do *Script* em *Python*

O *script* implementa uma função que realiza a leitura do arquivo XML gerado pelo aplicativo *pCon.scan*. Esse arquivo contém a descrição de todos os elementos escaneados (paredes, portas e janelas), e a função extrai essas informações em uma estrutura de dados que pode ser processada pelo *Python*. Os dados encontrados no XML são de comprimento, altura, espessura e cor de cada elemento, além da definição de sua posição nos eixos *x*, *y* e *z*, e sua rotação em *w*, *x*, *y* e *z*. Os eixos *x*, *y* e *z* são amplamente conhecidos na área da geometria, porém o eixo *w* gerou inicialmente um desafio teórico e prático que conseguiu ser solucionado a partir do entendimento do uso de *Quaternions* na representação tridimensional.

*Quaternions* permitem representar rotações de maneira mais eficiente e suave, proporcionando interpolações e combinações de rotações sem as ambiguidades e singularidades que podem surgir com outras representações de rotação. A multiplicação de *quaternions* corresponde à composição de rotações, e a sua



normalização garante rotações válidas. Assim, *quaternions* são uma ferramenta matemática poderosa para operações de rotação em 3D, garantindo estabilidade e precisão em aplicações práticas (SANDERSON, 2018). Essas funções foram incluídas para que os elementos ficassem corretamente posicionados e orientados no espaço tridimensional do *Revit*.

Com os dados de posição, comprimento e rotação das paredes, o script calcula as linhas base correspondentes a cada uma delas. Essas linhas já vêm adaptadas ao sistema do *Revit* e servem como referência para a criação das paredes nativas. Utilizando as linhas base, os parâmetros de altura e o tipo de parede escolhido pelo usuário, o *script* gera automaticamente as paredes nativas no *Revit*, eliminando a necessidade de inserção manual. Como o *Dynamo* usualmente opera em pés, foi implementada também uma função para converter automaticamente todas as dimensões extraídas do escaneamento (que estão em metros) para a unidade correspondente, garantindo a compatibilidade dos dados com o ambiente BIM. A Figura 28 ilustra a criação das paredes a partir das linhas base que são mostradas na janela do *Dynamo*.

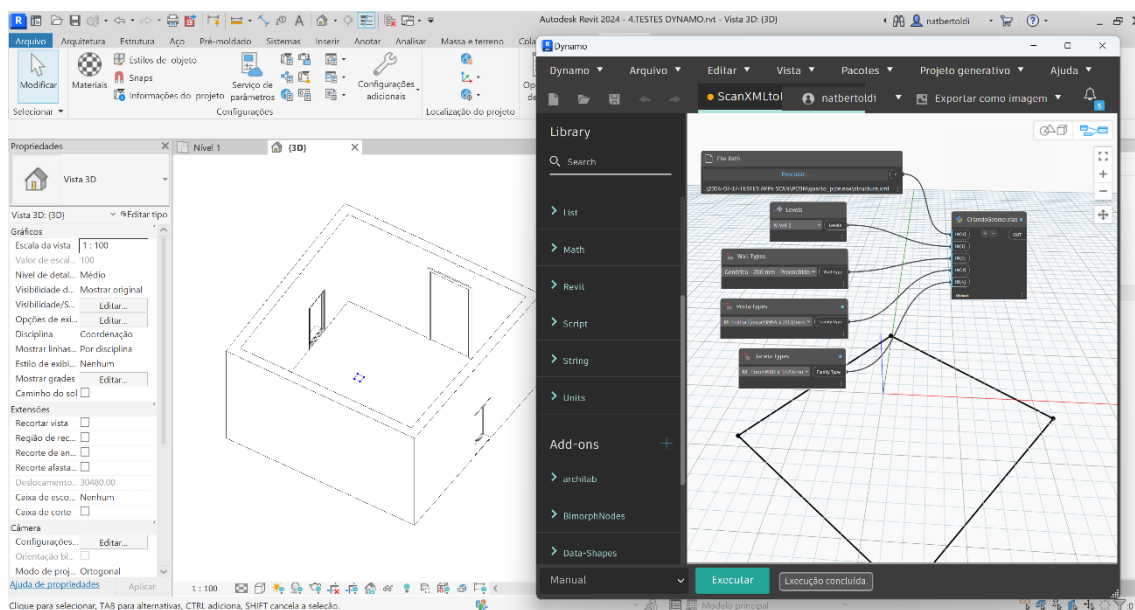


Figura 28: Criação de geometria no Revit através das linhas base representadas no Dynamo.

Fonte: Autora (2025).

Após a criação das portas e janelas, seus parâmetros são ajustados de acordo com as dimensões extraídas do levantamento. Porém, o próximo desafio

enfrentado no processo de modelagem foi a correta representação das portas e janelas no modelo BIM. Diferentemente das paredes, que podem ser definidas diretamente por parâmetros ajustáveis como largura, altura e níveis de base e topo, portas e janelas no *Revit* são criadas a partir de famílias, que são componentes paramétricos com configurações internas específicas, como dimensões e materiais.

Por padrão, esses elementos são controlados por parâmetros de tipo, o que significa que, para cada nova dimensão de porta ou janela, seria necessário criar uma nova família ou tipo correspondente. Para contornar essa limitação e adaptar automaticamente os elementos às medidas obtidas no levantamento, foi desenvolvida uma família de porta e uma de janela com parâmetros de instância, permitindo que as dimensões fossem ajustadas individualmente, e de forma automática, após a inserção, sem a necessidade de múltiplos tipos. No entanto, como o *Revit* insere essas aberturas a partir do eixo central da geometria, ao adaptar-se às novas dimensões, os elementos acabavam se deslocando lateralmente, assim como aparece na Figura 29. A solução encontrada foi realizar um ajuste no código *Python* que calcula a metade da largura da abertura e aplica esse deslocamento no momento da inserção, garantindo assim a posição correta das janelas no modelo.

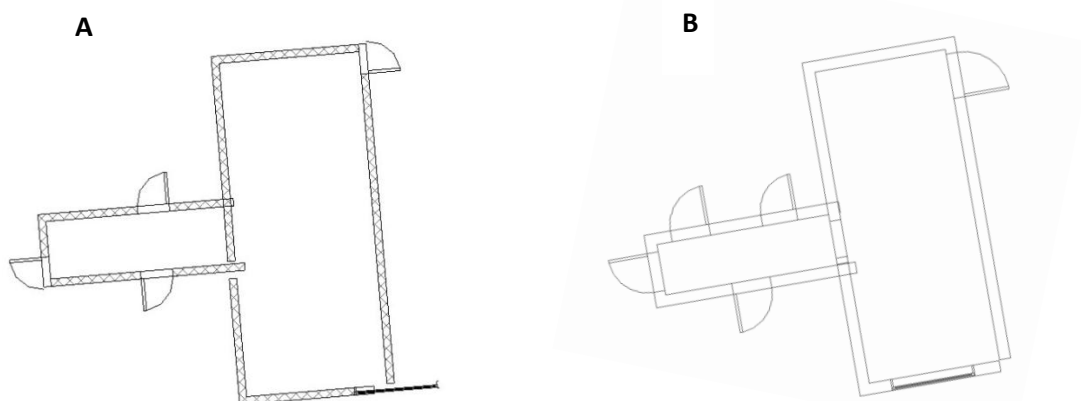


Figura 29: Portas e janela deslocadas da posição correta (A) e portas e janela conforme capturadas pelo escaneamento (B).

Fonte: Autora (2025).

## 4.5 Método convencional x Método proposto para levantamento e modelagem

### a. Estudo exploratório 1

O levantamento utilizando o método convencional, com fita métrica e registro manual das medidas, envolveu duas pessoas: uma responsável pela medição e outra pela anotação e representação gráfica. As dimensões dos espaços e das aberturas foram transferidas manualmente para o software de modelagem, reproduzindo os ambientes com base nos dados coletados em campo. As imagens na Figura 30 ilustram esse processo, desde o levantamento físico até o modelo gerado a partir dele.

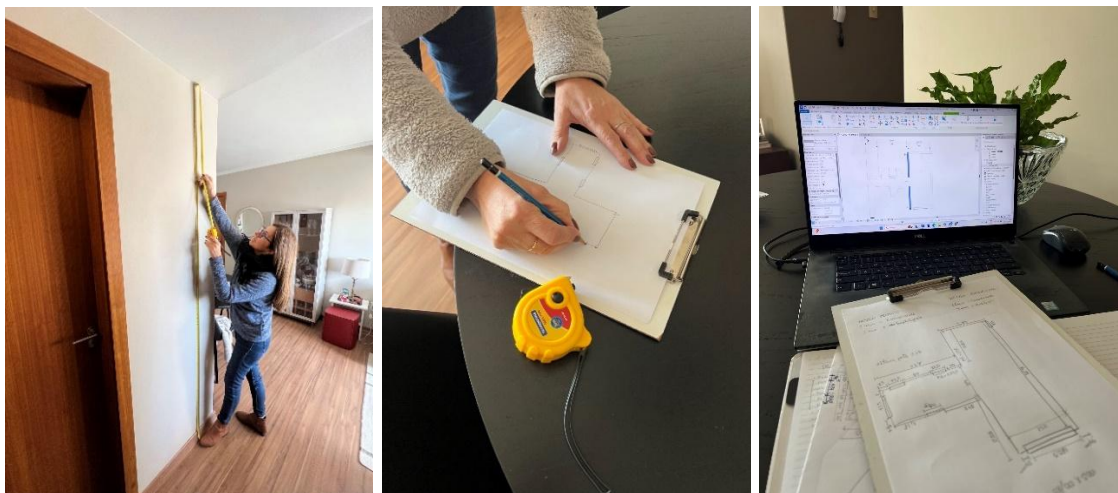


Figura 30: Imagens do processo de levantamento e modelagem convencional.

Fonte: Autora (2025).

Já na Figura 31, são apresentadas as imagens correspondentes ao levantamento realizado pelo método proposto, com uso do sensor LiDAR do iPhone e posterior processamento automatizado dos dados. O processo foi realizado por uma única pessoa e concluído em menor tempo, resultando em um modelo digital compatível com as exigências definidas para esse estudo. As imagens mostram desde a etapa de escaneamento até a visualização dos ambientes modelados no *Revit*.

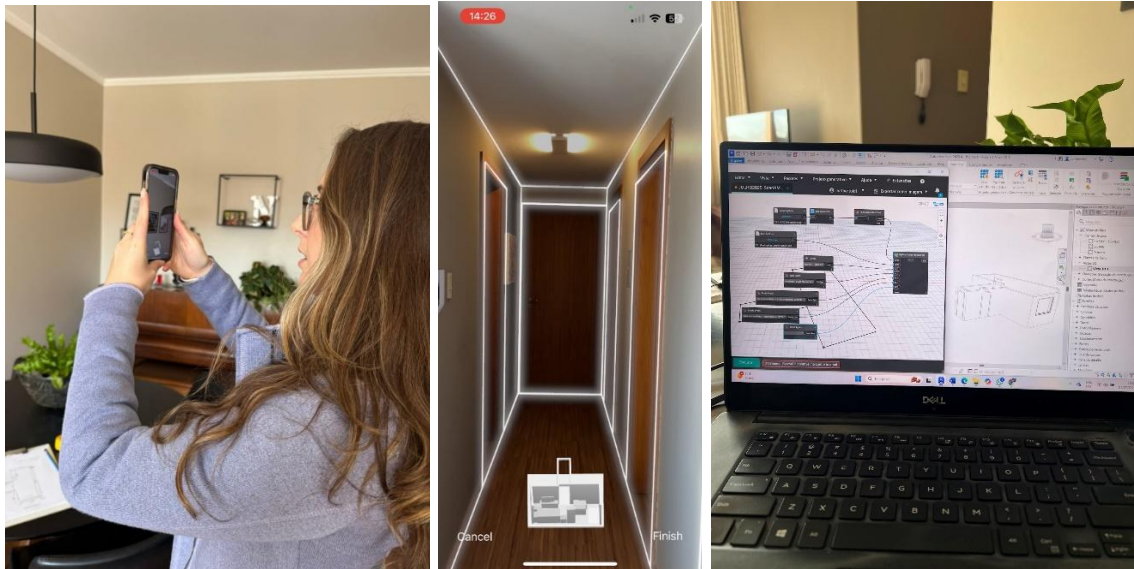


Figura 31: Imagens do processo de levantamento e modelagem proposto.

Fonte: Autora (2025).

Com os dois modelos prontos — um obtido via escaneamento LiDAR com processamento automatizado e outro pelo método convencional — foi possível realizar a comparação entre os resultados. Na Figura 32 os dois modelos finalizados no mesmo nível de detalhamento são colocados lado a lado para que fosse possível realizar essa análise comparativa.

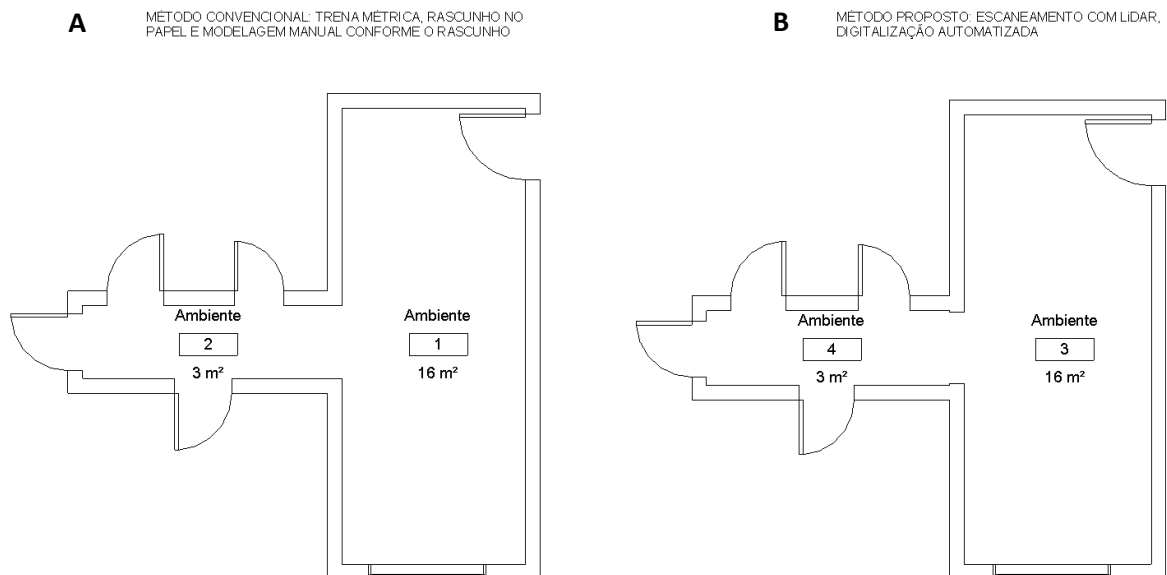


Figura 32: Modelo de referência com medidas coletadas com trena métrica (A) e com o levantamento por LiDAR (B).

Fonte: Autora (2025).

A comparação entre os métodos indicou diferenças favoráveis à abordagem digital no contexto avaliado. A avaliação considerou métricas como área dos ambientes, altura do pé-direito, área de aberturas, número de pessoas envolvidas e tempo total necessário para a execução do levantamento e modelagem. O Quadro 5 resume os principais dados e serve como base para analisar a agilidade e eficiência de cada método.

	Método convencional	Método proposto	Diferença
Área do ambiente 1	16m <sup>2</sup>	16m <sup>2</sup>	0% (Máx:10%)
Área do ambiente 2	3m <sup>2</sup>	3m <sup>2</sup>	0% (Máx:10%)
Pé direito 1	2,34m	2,33m	0,43% (Máx: 5%)
Pé direito 2	2,58m	2,58m	0% (Máx: 5%)
Área abertura	1,90m <sup>2</sup>	1,99m <sup>2</sup>	4,74% (Máx: 5%)
Número de pessoas	2	1	2x mais eficiente
Tempo gasto	18min	5min	3,6x mais rápido

Quadro 5: Comparação entre os métodos convencional e proposto.

Fonte: Autora (2025).

Nos dois ambientes analisados, as áreas obtidas pelo método proposto coincidiram com as medidas do levantamento convencional, não apresentando nenhuma diferença. O mesmo se observou para a altura (pé-direito) do segundo ambiente, sem qualquer diferença, e uma leve variação no primeiro, de apenas 0,43%, muito abaixo do limite máximo estabelecido de 5%. Em relação à área da abertura (janela), a diferença registrada foi um pouco maior, de 4,52%, ainda assim dentro do limite de tolerância. Ou seja, nesse caso de estudo, todos os resultados atenderam aos critérios definidos.

Destacam-se ganhos operacionais importantes: o levantamento com o método proposto foi realizado por apenas uma pessoa, enquanto o método convencional exigiu duas. O tempo total necessário também foi consideravelmente menor, com uma redução de 3,6x, passando de 18 minutos para apenas 5 minutos.

Esses dados demonstram que, além de atender aos requisitos estabelecidos, nesse caso o método proposto foi mais ágil, enxuto e eficiente, mostrando-se

especialmente promissor para levantamentos de edificações com características semelhantes.

#### b. Estudo exploratório 2

Neste segundo estudo exploratório, foi selecionado um ambiente com um diferencial importante: a presença de um ângulo oblíquo bem-marcado, que torna sua representação especialmente desafiadora nos levantamentos tradicionais. Esse tipo de geometria normalmente exige técnicas adicionais, como a triangulação de medidas e cuidados redobrados na conferência dos dados coletados, o que tende a aumentar o tempo de trabalho e a possibilidade de erros. O levantamento foi realizado por duas pessoas, utilizando fita métrica, trena eletrônica e papel para anotação, com posterior transposição manual das medidas para o *software* de modelagem. As imagens da Figura 33 ilustram esse processo.

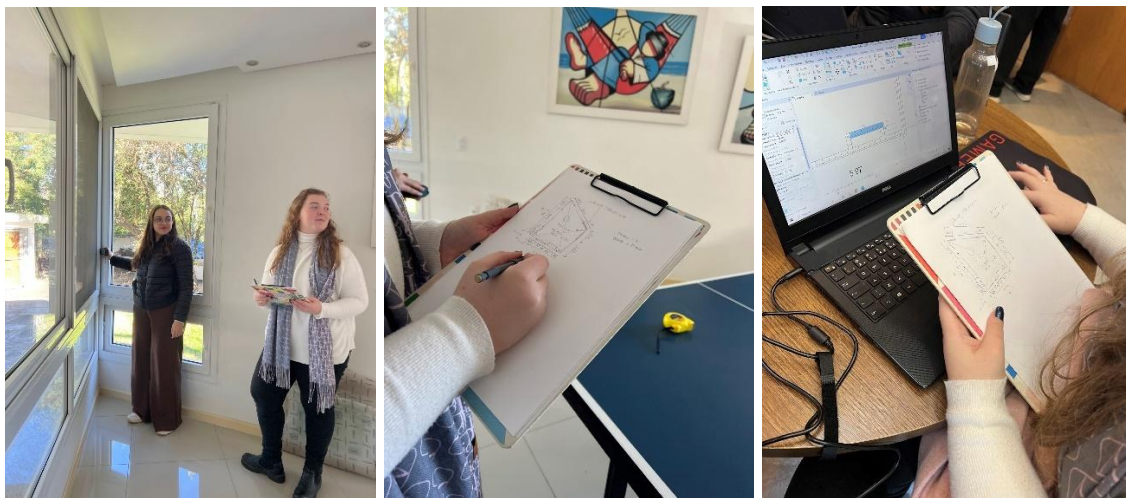


Figura 33: Imagens do processo de levantamento e modelagem convencional.

Fonte: Autora (2025).

Em seguida, o mesmo ambiente foi escaneado utilizando o sensor LiDAR do iPhone, conforme o método proposto. Apesar da praticidade do processo, foi necessário repetir o escaneamento três vezes até que todas as janelas e portas fossem corretamente captadas pelo aplicativo. Ainda que não tenha sido possível identificar exatamente o motivo da falha nas primeiras tentativas, esse tipo de situação evidencia a importância de revisar o modelo diretamente no



aplicativo logo após a coleta dos dados, garantindo que nenhum elemento essencial tenha sido perdido. O tempo total registrado para essa etapa foi de 8 minutos, considerando as três tentativas; caso o escaneamento tivesse sido bem-sucedido na primeira, essa etapa teria durado apenas cerca de 3 minutos. Após a coleta, o modelo foi salvo, descompactado e importado para o *Dynamo* no *Revit*, onde os dados foram lidos e processados em mais 4 minutos, totalizando 12 minutos para todo o procedimento com o método proposto. As imagens na Figura 34 mostram as etapas desse fluxo, do escaneamento à geração automatizada da geometria no ambiente BIM.

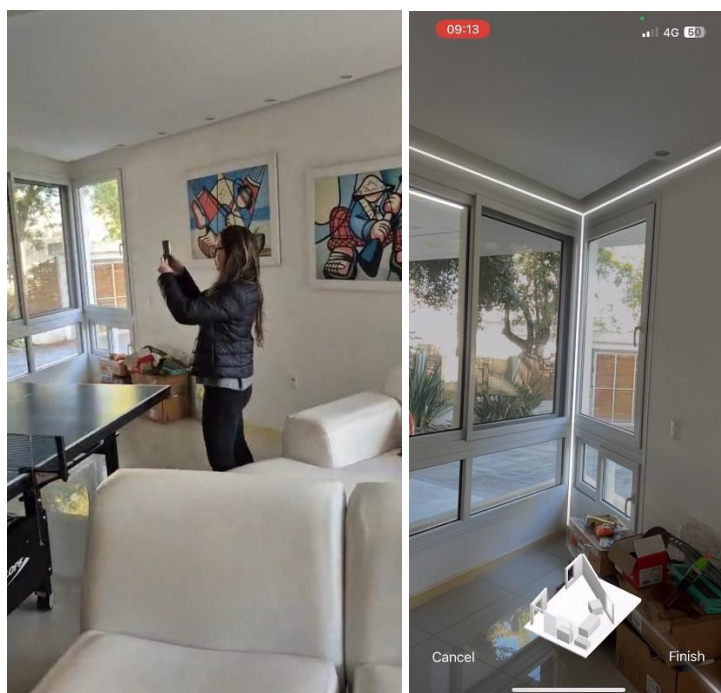


Figura 34: Imagens do processo de levantamento e modelagem proposto.

Fonte: Autora (2025).

Com ambos os modelos disponíveis — o gerado pelo método convencional e pelo método proposto — foi possível realizar uma análise comparativa detalhada, tanto em relação às dimensões gerais quanto ao ângulo presente no ambiente. Na Figura 35, são apresentadas imagens com os dois modelos lado a lado, evidenciando semelhanças, diferenças e o desempenho de cada método frente à complexidade espacial do ambiente.

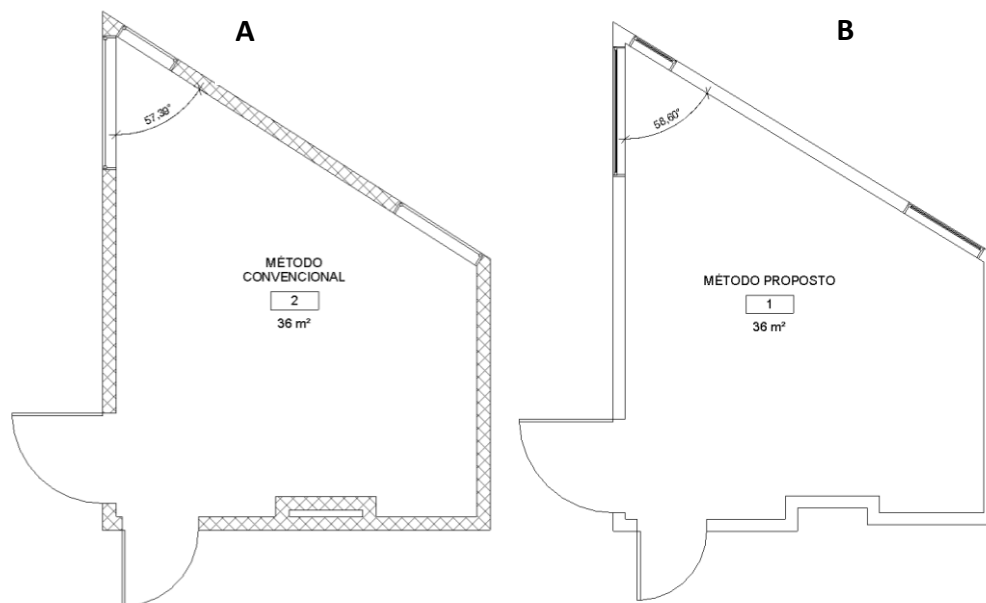


Figura 35: Modelo de referência com medidas coletadas com trena métrica e eletrônica (A) e com o levantamento por LiDAR (B).

Fonte: Autora (2025).

Embora a abordagem digital tenha apresentado vantagens na comparação realizada, também foram identificadas limitações relevantes na representação das esquadrias. Observou-se que, em um dos casos, as dimensões da abertura não foram fielmente capturadas, resultando em imprecisões que podem ser atribuídas à baixa legibilidade do ambiente, à transparência dos materiais ou à complexidade geométrica das janelas. Esses aspectos exigem atenção no uso do método, principalmente quando há necessidade de precisão nas esquadrias, embora não comprometam os avanços alcançados em relação à agilidade e eficiência geral do processo. O Quadro 6 resume os principais dados e serve como base para analisar a acurácia, agilidade e eficiência de cada método.



	Método convencional	Método proposto	Diferença
Área do ambiente	36m <sup>2</sup>	36m <sup>2</sup>	0% (Máx:10%)
Pé direito	2,52m	2,59m	2,78% (Máx: 5%)
Área abertura 1	4,30m <sup>2</sup>	4,18m <sup>2</sup>	2,79% (Máx: 5%)
Área abertura 2	2,04m <sup>2</sup>	1,49m <sup>2</sup>	26,96% (Máx: 5%)
Área abertura 3	3,08m <sup>2</sup>	3,06m <sup>2</sup>	0,65% (Máx: 5%)
Número de pessoas	3	1	3x mais eficiente
Tempo gasto	40min	12min	3,3x mais rápido

Quadro 6: Comparação entre os métodos convencional e proposto.

Fonte: Autora (2025).

A comparação entre os dois métodos de levantamento e modelagem no Estudo de Caso 2 demonstra que, em termos gerais, o método proposto apresentou desempenho bastante satisfatório na obtenção de informações espaciais do ambiente. A área total e o pé-direito foram captados com acurácia adequada, com variações inferiores ao limite máximo de tolerância definido (10% para área e 5% para alturas). Duas das janelas também apresentaram resultados dentro da margem de erro considerada aceitável. No entanto, uma abertura específica apresentou divergência significativa — de aproximadamente 26,96% —, o que pode ser atribuído a dificuldades pontuais na captação da geometria.

Durante o processo de escaneamento, é fundamental conferir continuamente a captura das esquadrias, ainda no momento da varredura. Isso porque, em determinadas situações, fatores como a estrutura e o formato da abertura, o contraste de profundidade, o material, o tamanho das guarnições ou mesmo a presença de caixa de persiana podem levar o sistema a interpretar incorretamente sua posição ou dimensões. Em alguns casos, o aplicativo pode utilizar referências erradas — como bordas internas ou externas diferentes das reais — resultando em imprecisões que comprometem a fidelidade do modelo. A verificação em tempo real permite identificar e corrigir essas falhas antes de concluir o levantamento, evitando retrabalho e garantindo maior confiabilidade nas informações obtidas.

Apesar dessa imprecisão pontual, o método proposto se destaca pela expressiva eficiência operacional: o processo foi realizado com apenas uma pessoa, em tempo 3,3 vezes menor que o necessário no método convencional, que demandou uma equipe de três profissionais. Essa economia de tempo e mão de obra representa uma vantagem significativa em contextos em que agilidade e custo reduzido são prioridades, especialmente em levantamentos preliminares ou em projetos de grande escala.

#### **4.6 Estudos geométricos de casos específicos**

Conforme a pesquisa de Rodrigues (2023), os 18 problemas geométricos encontrados no estudo conduzido por Xu (2021) foram analisados para definir quais as limitações do uso do *Revit* para Simulação de Eficiência Energética, e qual era o método correto de criação dos modelos analíticos, para alcançar os resultados da simulação. A partir disso, analisou-se apenas os problemas geométricos que poderiam interferir na etapa de levantamento e modelagem de ambientes internos no método proposto, totalizando sete casos a serem estudados. Com isso, foram feitos testes para observar quais desses 7 problemas apresentados merecem uma atenção especial durante o escaneamento 3D. Além desses problemas, foram acrescentados mais dois testes: um para descobrir se em levantamentos com vários ambientes, o aplicativo conseguiria ter um resultado satisfatório; e o outro em um ambiente com forro inclinado, para visualizar como o modelo é gerado.

- **Caso 01 - meia parede**

Para o levantamento da geometria por meio dos aplicativos de escaneamento, os elementos são captados corretamente com sua devida altura, embora seja necessário a conferência visual após o processamento para garantir que a altura ficou indicada corretamente. Para transformar o levantamento em um modelo *Revit*, o código inserido indica as configurações de cada parede, incluindo sua medida vertical. Com isso, é possível gerar corretamente uma meia parede a

partir do escaneamento a laser com o *RoomPlan*, conforme pode ser visto na Figura 36.

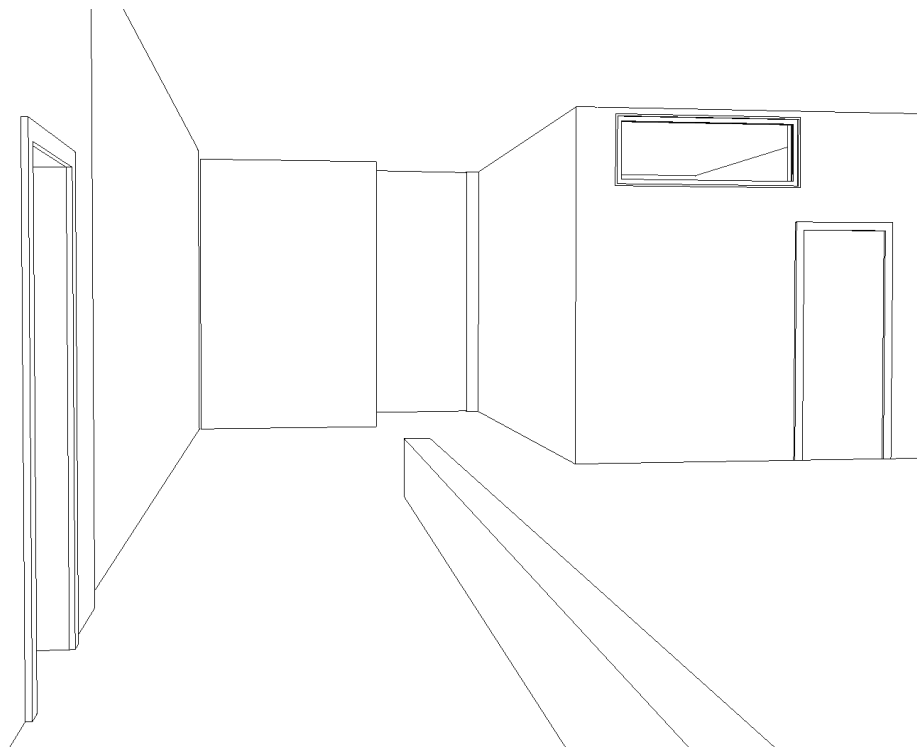


Figura 36: Representação de parede mais baixa que as demais.

Fonte: Autora (2025).

- Caso 02 - forro de alturas diferentes

Durante os testes com geometrias específicas, foram analisados exclusivamente os comportamentos relacionados à criação de paredes e aberturas, uma vez que elementos horizontais como pisos e forros não são diretamente captados pelo levantamento com o *pCon scan*. No método adotado, a modelagem dos forros no ambiente BIM é realizada com base na altura final das paredes geradas, sendo essa a única referência disponível para determinar a altura do teto. Entretanto, o levantamento realizado não reconhece geometrias mais complexas, como sancas ou rebaixos localizados no interior do ambiente, limitando-se à captação das superfícies verticais que definem o contorno do espaço. Com isso, o modelo resultante apresenta uma versão simplificada da realidade construída, sendo necessária uma conferência visual, por meio de fotos, vídeos ou inspeção presencial, para verificar se a volumetria gerada corresponde adequadamente às condições existentes.

Para fins de simulação energética, os forros devem ser modelados seguindo o eixo das paredes, mesmo que esse não seja o procedimento mais comum em processos tradicionais de modelagem. Essa abordagem garante a compatibilidade geométrica necessária para a geração do modelo analítico.

Na Figura 37, observa-se uma diferença de altura entre os segmentos de parede (A), indicando que o corredor e a área junto à janela apresentam um forro mais baixo — como pode ser confirmado na imagem de referência (B). No entanto, o trecho da parede destacada pela seta não refletiu corretamente o rebaixo do forro, mantendo a altura constante em toda a parede. Isso evidencia uma limitação na interpretação do escaneamento em áreas com variações pontuais de altura, exigindo atenção redobrada na conferência e ajuste posterior no modelo gerado.

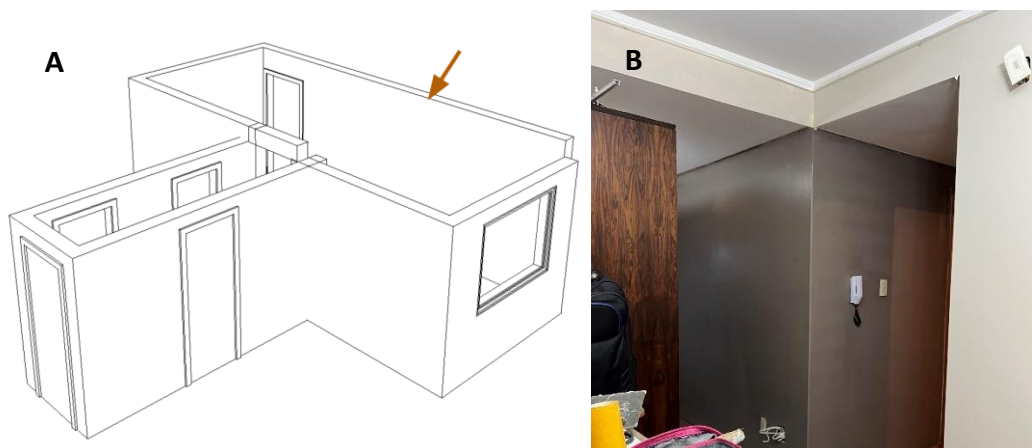


Figura 37: Forros de diferentes alturas no mesmo ambiente.

Fonte: Autora (2025).

- Caso 03 - átrio

Xu (2021) define átrio como um ambiente com pé-direito elevado, geralmente abrangendo dois ou mais entrepisos em sua altura total, o que caracteriza um espaço com pé-direito duplo. Como mencionado anteriormente, no modo RoomPlan de escaneamento, os pisos e forros não são capturados diretamente,

o que exige uma análise criteriosa de cada caso para verificar se a geometria do modelo gerado corresponde à realidade.

Dois fatores tornam-se especialmente relevantes na representação correta de átrios: o alcance do sensor LiDAR e o planejamento adequado do percurso de escaneamento. Como o alcance do LiDAR é limitado, em ambientes com pé-direito superior a 5 metros, pode haver perda de dados na parte superior das paredes, comprometendo a precisão da altura registrada. Além disso, a forma como o escaneamento é conduzido interfere diretamente no resultado. Quando o ambiente é escaneado a partir do nível inferior, é possível captar a altura total da parede até o entrepiso, o que pode ajudar a identificar a altura real da laje intermediária. No entanto, se o escaneamento da mesma parede for feito a partir do nível superior, essa referência pode se perder, resultando em uma representação incompleta ou imprecisa da volumetria do espaço.

Outro fator que influencia essa decisão é a presença de janelas na parte inferior e superior do entrepiso. Na Figura 38 (A), por exemplo, optou-se por escanear com o objetivo de captar a altura total das paredes, preservando a localização das janelas existentes. Apesar disso, a altura do entrepiso não pôde ser determinada com precisão, pois apenas o perímetro da parede foi registrado de forma clara. Já na Figura 38 (B), como não havia janelas na parte superior, todo o escaneamento foi realizado pelo pavimento térreo, o que permitiu a geração de uma parede com altura total do átrio, uma com a altura até o entrepiso, e duas incluindo as variações entre a porção com pé-direito duplo e o mezanino. É importante ressaltar que, assim como em outros casos, segmentos contínuos de parede não permitem representar desníveis de altura. A parede gerada assume sempre a altura da parte mais elevada, o que reforça a necessidade de

planejamento estratégico antes da aquisição dos dados, especialmente em ambientes com variações verticais significativas.

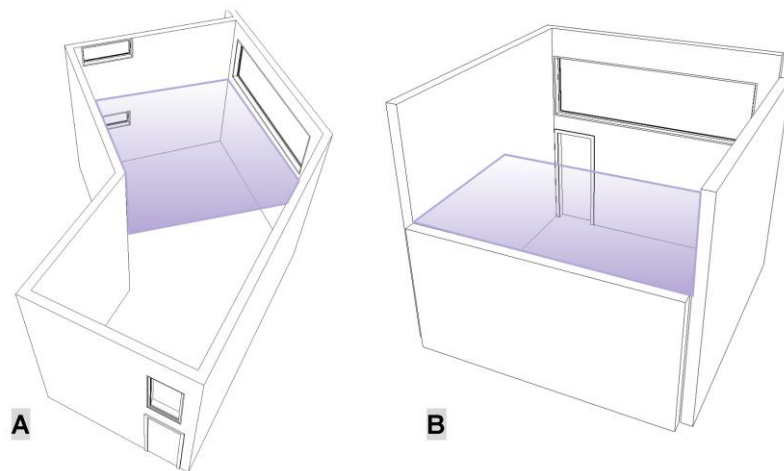


Figura 38: Exemplo de escaneamento de ambiente com pé direito duplo.

Fonte: Autora (2025).

- Caso 04 – Janela interna

No caso de janelas internas — ou seja, aberturas que conectam dois ambientes internos, em vez de se voltarem para o exterior —, foi observado que, em geral, esses elementos são corretamente reconhecidos durante o escaneamento, como mostrado na Figura 39. No entanto, em alguns casos a detecção depende das condições de iluminação do ambiente vizinho. Como os aplicativos de escaneamento utilizam variações de profundidade e contraste de luz para identificar aberturas nas paredes, a ausência de iluminação no ambiente contíguo pode fazer com que a janela não seja interpretada corretamente.

Essa atenção ao contexto e às condições do local faz parte do planejamento necessário para a execução eficiente do levantamento, especialmente em situações em que os elementos não estão expostos à luz natural ou apresentam características menos evidentes do ponto de vista geométrico.

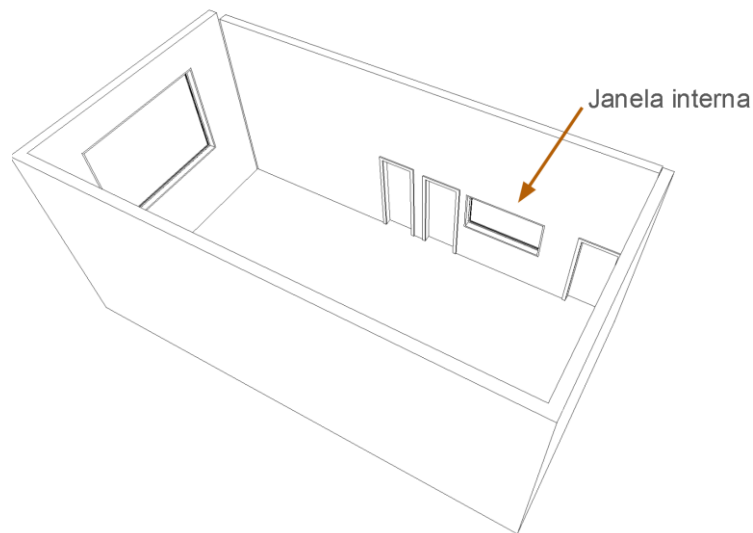


Figura 39: Janela que conecta dois ambientes.

Fonte: Autora (2025).

- Caso 05 - ambiente côncavo

Em ambientes onde as paredes formam ângulos côncavos (maiores que  $180^\circ$ ), foram identificados erros específicos na geometria gerada pelo aplicativo *pCon.scan*. Nestes casos, a conexão entre as paredes não é representada corretamente no modelo tridimensional, resultando em uma distorção visual semelhante a um pilar chanfrado no ponto de junção. Esse problema é perceptível ainda na visualização do aplicativo e se intensifica após a conversão para o *Revit*, quando, por meio da leitura do código XML, as paredes acabam se sobrepondo de forma inadequada, conforme ilustrado na Figura 40.

Além disso, mesmo em configurações ortogonais (com ângulos retos), foram observadas falhas pontuais nas conexões entre as paredes. Nestes casos, ao contrário da sobreposição encontrada nos ângulos côncavos, as paredes não se unem corretamente, deixando um pequeno espaçamento entre os elementos. Apesar desses erros geométricos, ambos os casos podem ser corrigidos de forma simples e rápida diretamente no *Revit*, apesar de ser uma correção

manual, utilizando o comando *Trim*, que permite ajustar as junções e garantir a continuidade entre os elementos.

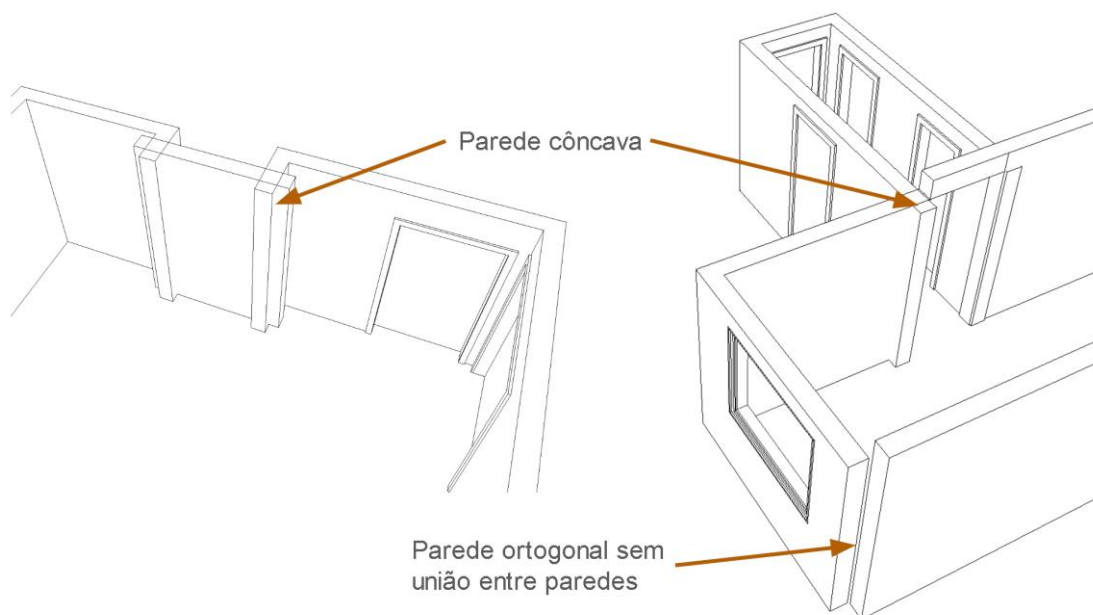


Figura 40: Erro em paredes cônicas e ortogonais no aplicativo *pCon.scan*.

Fonte: Autora (2025).

É importante destacar que este erro não foi observado ao testar os mesmos ambientes em outros aplicativos de escaneamento com suporte a LiDAR, o que indica que se trata de uma limitação específica do *pCon.scan* no reconhecimento de geometrias com ângulos internos mais abertos. Portanto, trata-se de um ponto que pode ser aprimorado em futuras atualizações do aplicativo, visando maior precisão e fidelidade na representação espacial.

- Caso 06 - pele de vidro

Segundo Rodrigues (2023), na simulação de eficiência energética, paredes com pele de vidro apresentam limitações significativas, especialmente quando há diferenciação de estruturas dentro da própria composição da fachada — como trechos opacos, caixilhos metálicos ou subdivisões entre painéis. Essas variações estruturais não são corretamente interpretadas na simulação, o que compromete a atribuição precisa das propriedades térmicas dos materiais.



No caso do levantamento com dispositivos móveis utilizando tecnologia LiDAR, as paredes com pele de vidro também se mostraram problemáticas. Quando a superfície envidraçada vai do piso ao teto, o aplicativo *pCon.scan* frequentemente não reconhece o elemento como uma abertura ou parede, resultando em lacunas no modelo gerado. A identificação só ocorre quando há um trecho de parede opaca abaixo ou acima da superfície de vidro, o que permite que o aplicativo classifique o elemento como janela ou porta-janela. A Figura 41 ilustra uma tentativa de escaneamento em um local com fachada envidraçada, na qual múltiplas tentativas foram realizadas, mas o elemento não foi reconhecido, evidenciando as limitações do método em contextos com materiais transparentes.



Figura 41: Tentativa de escaneamento em local com parede envidraçada.

Fonte: Autora (2025).

- Caso 07 - parede curva

As formas curvas em paredes representam um desafio significativo para os métodos de levantamento automatizados com *RoomPlan*. Durante o escaneamento, superfícies curvas são interpretadas como uma sequência de vértices, que, por sua vez, são simplificados pelo algoritmo do aplicativo em segmentos retos. Com isso, a curvatura original da parede é perdida, e o modelo resultante apresenta uma aproximação facetada da forma real, conforme a

Figura 42. Essa limitação compromete a fidelidade geométrica em edificações com elementos curvos, sendo necessária, nesses casos, uma posterior correção ou remodelagem manual para preservar a intenção arquitetônica original.



Figura 42: Escaneamento de parede curva no *pCon scan*.

Fonte: Autora (2025).

- Caso 08 – Múltiplos ambientes no mesmo escaneamento

Esse caso permitiu avaliar o desempenho do método em situações que envolvem continuidade espacial e a conexão entre diferentes cômodos, observando a capacidade da solução em manter a coerência geométrica e a organização dos dados ao longo de um levantamento mais extenso e interligado. A análise desse tipo de configuração é essencial para validar a aplicação do processo em ambientes maiores, nos quais a precisão das junções e a consistência entre os espaços são fundamentais para a qualidade do modelo final.

O ambiente testado nesse caso continha oito cômodos simples, sem grandes complexidades geométricas individualmente. No entanto, por se tratar de uma

captura mais extensa, envolvendo a mudança de um ambiente para outro em um único escaneamento contínuo, o modelo final apresentou inconsistências e diversos erros na geometria, como mostra a Figura 43. Alguns aplicativos que apresentam mais funcionalidades, como é o caso do MagicPlan, já oferecem o recurso de *MultiRoom*, que permite escanear ambientes separadamente, preservando a relação espacial entre eles por meio de um sistema de coordenadas unificado, o que seria a situação ideal. No caso do aplicativo *pCon Scan*, utilizado neste trabalho, esse recurso ainda não está disponível. Até que esse tipo de avanço seja incorporado, a solução adotada no método proposto exige que os ambientes sejam escaneados individualmente e, posteriormente, rotacionados e posicionados manualmente no local correto dentro do *Revit*, o que pode demandar um esforço adicional de organização.

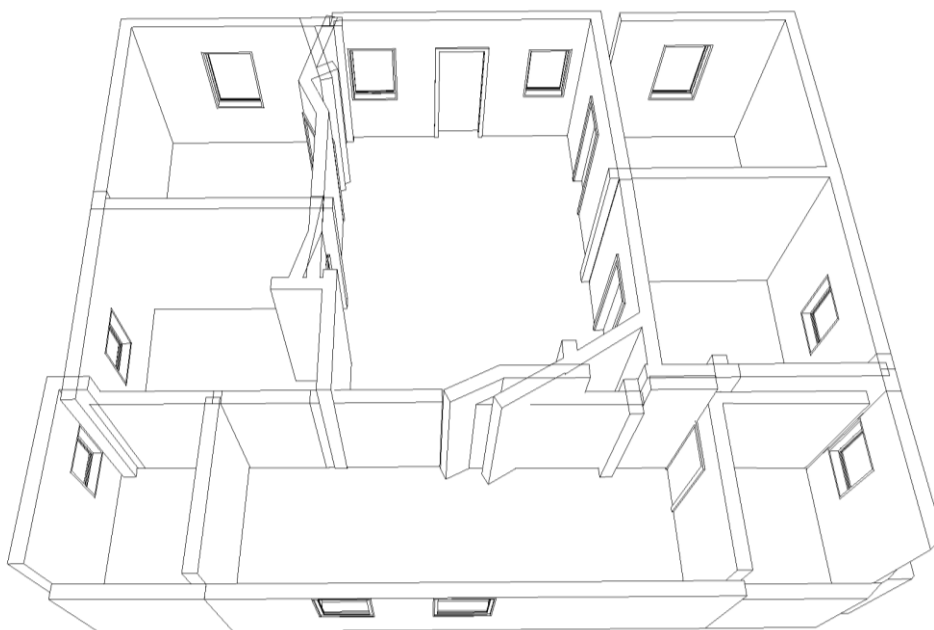


Figura 43: Escaneamento de múltiplos ambientes.

Fonte: Autora (2025).

- Caso 09 – Forro inclinado

O último teste foi realizado em um ambiente com forro inclinado, especificamente um quarto cuja cobertura acompanha as duas águas do telhado. Como pode ser observado na Figura 44 (A), nos dois extremos do cômodo as paredes laterais apresentam menor altura, refletindo corretamente os pontos mais baixos da

inclinação do telhado. No entanto, a parede inclinada que acompanha a inclinação da cobertura é representada apenas com a altura do seu ponto mais alto, resultando em uma simplificação da geometria real (Figura 44-B). Esse comportamento evidencia uma limitação do escaneamento realizado no modo RoomPlan pelo aplicativo *pCon scan*.

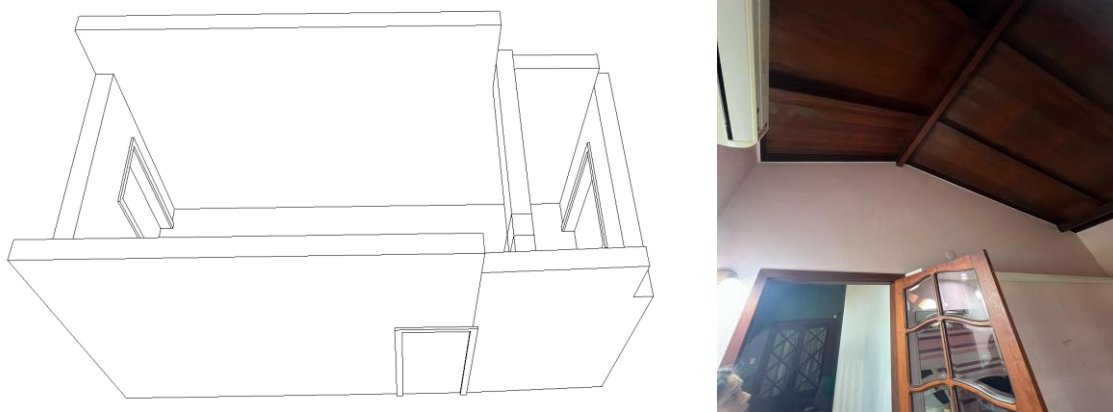


Figura 44: Representação do ambiente com o forro inclinado em duas águas (A), foto da geometria real do local (B).

Fonte: Autora (2025).

- Conclusões sobre os estudos geométricos

Os estudos realizados com geometrias específicas permitiram explorar de forma mais aprofundada as capacidades e limitações do método automatizado proposto, a partir de diferentes configurações arquitetônicas. Foram testadas nove situações distintas, abrangendo: meia parede, forros com alturas diferentes, pé direito duplo, janela interna, ambientes côncavos (e paredes ortogonais com falhas de junção), pele de vidro, paredes curvas, múltiplos ambientes interligados e forro inclinado. De maneira geral, os testes demonstraram que, embora o método se mostre eficaz na geração automática de elementos básicos como paredes, portas e janelas, há limitações significativas quando se trata de geometrias mais complexas ou menos convencionais. Questões como ausência de captura de superfícies horizontais, e a falta de reconhecimento de peles de vidro e paredes curvas, revelam desafios que ainda precisam ser superados. Por outro lado, casos como a meia parede e a janela interna demonstraram que, em condições adequadas de escaneamento,

o sistema é capaz de gerar elementos coerentes e com informações geométricas precisas. Esses testes contribuíram para refinar a compreensão sobre os contextos de maior ou menor aplicabilidade do processo, ampliando sua robustez e oferecendo subsídios importantes para ajustes futuros na metodologia.

A avaliação dos casos de geometrias específicas concentrou-se na análise da fidelidade da construção geométrica resultante a partir do escaneamento e da posterior geração automatizada dos elementos arquitetônicos no *Revit*. Para os resultados mostrados no Quadro 7, foram definidos três critérios de avaliação que indicam o grau de compatibilidade entre a geometria real e o modelo gerado: Atendido Plenamente (AP), quando a geometria foi corretamente captada e modelada, sem necessidade de ajustes posteriores; Atendido com Ressalvas (AR), quando a geometria principal foi representada de forma satisfatória, mas demandou intervenções manuais no *Revit* para correções pontuais; e Não Atendido (NA), quando o método não foi capaz de gerar a geometria corretamente, exigindo modelagem manual completa ou apresentando limitações que comprometem sua aplicabilidade. Esses critérios permitiram classificar de forma sistemática o desempenho do método frente às diferentes configurações geométricas testadas, contribuindo para uma análise crítica da sua robustez e aplicabilidade em contextos diversos.

	<b>Foi possível solucionar com o método proposto?</b>	<b>Observações</b>
<b>Meia parede</b>	AP	-
<b>Forros de diferentes alturas</b>	AR	Criar forros manualmente de acordo com altura das paredes
<b>Átrio</b>	AR	Definir melhor percurso para o escaneamento em cada caso
<b>Janela interna</b>	AP	-
<b>Ambiente côncavo</b>	AR	Unir paredes manualmente
<b>Pele de vidro</b>	NA	-
<b>Parede curva</b>	NA	-
<b>Múltiplos ambientes</b>	NA	Fazer múltiplos escaneamentos
<b>Forro inclinado</b>	NA	-

Quadro 7: Síntese dos resultados obtidos após a realização dos testes de geometrias específicas.

Fonte: Autora (2025).

Independentemente de o caso analisado ter sido atendido plenamente, com ressalvas ou mesmo de se tratar de uma geometria simples, é fundamental que, ao finalizar o escaneamento, seja feita uma conferência no local para verificar se todos os elementos relevantes foram corretamente captados. Caso contrário, o escaneamento deve ser repetido, a fim de garantir a fidelidade do modelo gerado. Além disso, é importante considerar que os aplicativos de escaneamento estão em constante atualização, podendo haver melhorias significativas em versões futuras. Os resultados apresentados nesta etapa dizem respeito especificamente ao uso do *pCon.scan*, por ser o único, até o momento, que possibilitou a geração automatizada do modelo no *Revit* por meio de integração direta com programação visual. Ressalta-se, no entanto, que o *pCon.scan* é um aplicativo gratuito, de uso simples e com recursos limitados, e que outros aplicativos mais avançados já oferecem funcionalidades mais completas, como o escaneamento contínuo de múltiplos ambientes com preservação do sistema de coordenadas, o reconhecimento de paredes curvas ou de forros inclinados, o que aponta para um potencial de aprimoramento futuro do método desenvolvido.

#### **4.7 Estudo de caso para avaliação do processo**

Após os testes pontuais realizados em geometrias específicas e a comparação com o método convencional, tornou-se necessário aplicar o processo completo de levantamento e modelagem automatizada em uma edificação de maior porte. A proposta deste estudo foi verificar o desempenho do método em um cenário real, que envolvesse não apenas ambientes isolados, mas uma volumetria mais extensa e articulada, exigindo a execução de todas as etapas do fluxo proposto, desde o planejamento e escaneamento até a reconstrução no ambiente BIM e posterior análise para simulação. A aplicação em um edifício com múltiplos ambientes e níveis permitiu observar como o método se comporta diante de desafios de escala, continuidade espacial e organização dos dados, além de possibilitar uma avaliação mais robusta da viabilidade do processo em demandas reais de projeto. Para organizar essa avaliação, o estudo de caso foi estruturado em cinco etapas principais:

## A. Planejamento

A primeira etapa consistiu no planejamento e análise preliminar da aplicação do método no edifício selecionado. Foram realizadas visitas para avaliar a viabilidade do processo, levando em conta aspectos como o número de ambientes, presença de desníveis, complexidade geométrica e possíveis obstáculos que pudessem interferir na captura dos dados. Também foi avaliado o objetivo final do levantamento, verificando se o método desenvolvido atendia aos requisitos de uso do modelo.

Buscando selecionar um estudo de caso oportuno, que permitisse testar o processo em um contexto semelhante ao objetivo final do projeto, considerou-se a utilização do prédio do Centro de Engenharias (CEng) da UFPel. Havia uma demanda real relacionada à efficientização energética da edificação, e a possibilidade de contribuir com esse projeto despertou o interesse em utilizá-lo como estudo de caso para validação do processo. No entanto, durante a etapa inicial de análise, o CEng foi descartado como objeto de estudo devido à sua alta complexidade geométrica, à presença de múltiplos pavimentos e desníveis, e à necessidade de um esforço significativo de modelagem e ajustes. Essas características contrariam os princípios que orientam o método proposto, que visa simplificar e agilizar o processo de reconstrução volumétrica. Além disso, como o edifício do CEng já dispunha de plantas baixas em formato *DWG*, optou-se por realizar apenas uma conferência pontual das medidas com métodos tradicionais de levantamento, não sendo necessária a aplicação do processo automatizado em sua totalidade.

Diante disso, o estudo de caso foi redirecionado para um edifício mais alinhado aos objetivos do trabalho, que permitisse validar a proposta com maior coerência. Nesse contexto, surgiu a oportunidade de aplicar o método no prédio da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo (FAUrb), também da UFPel. A demanda partiu do grupo do Programa de Educação Tutorial (PET) do curso de Arquitetura e Urbanismo, que necessitava de um levantamento da edificação para subsidiar um projeto de acessibilidade. A Figura 45 mostra uma foto do prédio por dentro (A) e outra por fora (B). Diante do prazo reduzido para atender

à demanda e cientes da pesquisa em andamento, os integrantes do grupo procuraram a pesquisadora com o intuito de utilizar o processo automatizado de levantamento e modelagem volumétrica como uma solução viável para responder à necessidade com agilidade. Apesar de o objetivo final não estar diretamente ligado à simulação de eficiência energética — foco principal desta pesquisa —, o estudo de caso revelou-se pertinente por envolver a geração de um modelo volumétrico com grau de precisão suficiente para a finalidade proposta. A ausência de necessidade de um alto nível de detalhamento e a tolerância a pequenas imprecisões tornaram o contexto especialmente adequado para testar a viabilidade prática do método, principalmente em termos de tempo, esforço e compatibilidade do modelo gerado.

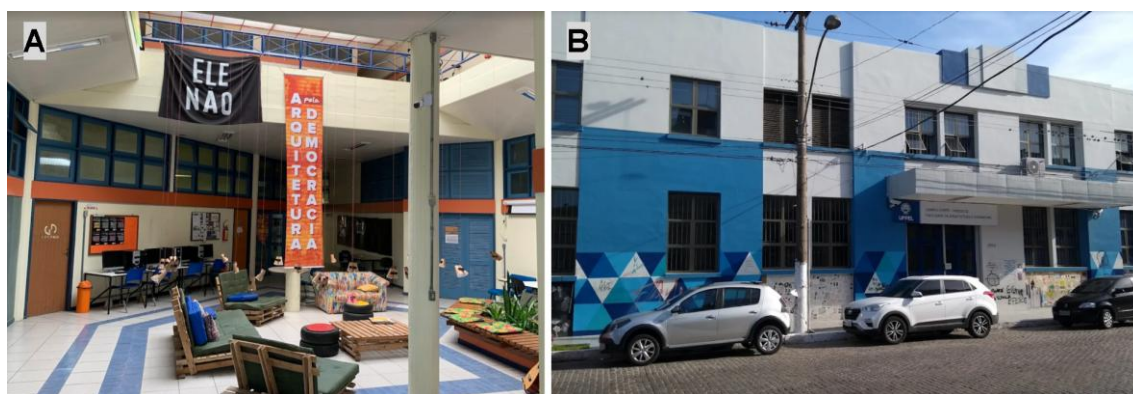


Figura 45: Foto interna da FAUrb (A). Foto da fachada da FAUrb (B).

Fonte: Autora (2025).

Durante o planejamento da aplicação do método no edifício da FAUrb, também se analisou qual seria a melhor estratégia para a execução do levantamento digital do ambiente. Considerando a extensão e a configuração espacial do edifício, e dado o estudo feito anteriormente sobre escaneamento de múltiplos ambientes, optou-se por realizar escaneamentos individuais de cada ambiente (salas, corredores, sanitários etc.), para posteriormente unificá-los dentro do *Revit*, compondo a planta completa.

Esse direcionamento levou a uma questão central: como garantir que os diferentes ambientes escaneados separadamente fossem corretamente posicionados entre si no modelo final? Em alguns aplicativos de escaneamento, como já mencionado anteriormente, é possível escanear um ambiente, finalizar,



e continuar escaneando um próximo ambiente sem sair do sistema de coordenadas inicial. Entretanto, como o método adotado nesta pesquisa foi baseado no aplicativo *pCon Scan*, foi necessário pensar em uma alternativa viável para solucionar essa limitação.

A solução adotada envolveu aceitar que cada ambiente seria gerado individualmente, o que exige uma etapa manual posterior de posicionamento, na qual os ambientes devem ser inseridos no *Revit* como “peças” de um quebra-cabeças, montando a planta a partir da justaposição desses volumes. Essa abordagem trouxe consigo novos desafios, especialmente no que diz respeito à organização dos elementos no ambiente BIM e à tentativa de evitar sobreposição acidental entre ambientes — algo que poderia gerar erros e confusão na geometria final. Até então, o método havia sido testado apenas com um escaneamento por vez, sempre gerado na mesma posição de inserção dentro do *Revit*, o que não representava problema. No entanto, ao passar a trabalhar com múltiplos escaneamentos, tornou-se necessário garantir que cada conjunto de elementos fosse distinguível e isolável. Para isso, foi feito um ajuste no código em *Python*, de modo que, a cada execução da rotina, todos os elementos gerados (paredes, portas e janelas) fossem organizados automaticamente em um grupo dentro do *Revit*, nomeado com base no horário e data de execução. Essa estratégia de agrupamento se mostrou fundamental para a organização do processo, permitindo que o usuário mantenha o controle de cada ambiente gerado, posicione-os adequadamente no modelo geral e tenha maior segurança para editar, mover ou excluir conjuntos de elementos sem interferir acidentalmente nos demais.

## **B. Aquisição de Dados**

Nesta fase, foi realizado o escaneamento do edifício utilizando a tecnologia LiDAR do smartphone com o recurso do *RoomPlan*, por meio do aplicativo *pCon.scan*. Após a captura, os dados foram conferidos no próprio aplicativo, comparando a geometria gerada com as condições reais observadas no local. Quando necessário, o escaneamento foi repetido para corrigir falhas ou lacunas.

Nessa etapa, foi essencial identificar as limitações práticas do processo de captura automatizada em uma edificação de maior porte e complexidade. Durante a aquisição dos dados, diversos desafios foram identificados, o que contribuiu para um entendimento mais aprofundado das condições ideais e dos limites operacionais do método. Entre os principais pontos observados, destacam-se:

- Tempo de detecção de aberturas: em alguns ambientes, o aplicativo demorou para captar determinadas janelas, exigindo a repetição do escaneamento ou ajustes na movimentação durante a captura. Isso ocorreu especialmente em ambientes maiores e com mais informações, como o saguão da FAUrb, onde o tempo de coleta é maior.
- Ausência de detecção de desníveis: o sistema não reconhece desníveis no piso entre ambientes, o que é uma limitação importante em edificações com variações de altura entre setores. Nesse caso se dividiu os escaneamentos entre os desníveis existentes, e para obter a dimensão de diferença entre os níveis, foi feito um escaneamento no modo LiDAR através do aplicativo *Polycam* (Figura 46), onde foi possível conseguir essas informações.



Figura 46: Captura de tela do escaneamento com nuvem de pontos através do aplicativo *Polycam* para captar os desníveis.

Fonte: Autora (2025).

- Ambientes muito pequenos: salas e sanitários com dimensões reduzidas apresentaram dificuldades de escaneamento, pois o pouco espaço e o ângulo restrito dificultam o mapeamento adequado das superfícies.
- Interpretação incorreta de elementos visuais: em um dos espaços, duas janelas próximas foram interpretadas como uma única abertura, devido à presença de uma cortina translúcida, que comprometeu a visualização clara da separação entre os elementos. Isso indica que o ideal é que as cortinas sejam abertas para visualização total das aberturas.
- Elementos reconhecidos incorretamente: uma tela de projeção foi reconhecida como janela, enquanto janelas reais posicionadas acima das portas, nem sempre eram registradas.
- Ambientes sem iluminação: em três ambientes, não foi possível realizar o escaneamento devido à ausência total de luz artificial ou natural, evidenciando a dependência do método por boas condições de iluminação.

Esses pontos demonstram que, embora o processo de aquisição seja ágil e prático em muitas situações, ele ainda não substitui completamente a verificação presencial e o julgamento técnico do operador. Diante dessas limitações, foram feitas fotos e vídeos complementares dos ambientes, de modo a possibilitar a conferência posterior e a correção manual de eventuais falhas no modelo gerado.

Apesar dos desafios encontrados durante a aquisição dos dados, a etapa também permitiu identificar potenciais benefícios do uso do escaneamento por LiDAR via RoomPlan. Entre elas, destaca-se a facilidade de captura de geometrias com perímetros complexos, mesmo em ambientes com múltiplos ângulos e recortes pouco ortogonais. Como ilustrado na Figura 47, o método foi capaz de identificar e representar uma configuração espacial que, em levantamentos convencionais, exigiria um esforço considerável de medição e interpretação manual. Essa capacidade de registrar formas irregulares de maneira ágil e com fidelidade à realidade é um dos principais diferenciais

positivos do processo, especialmente em contextos onde a planta do ambiente não segue padrões retangulares simples.

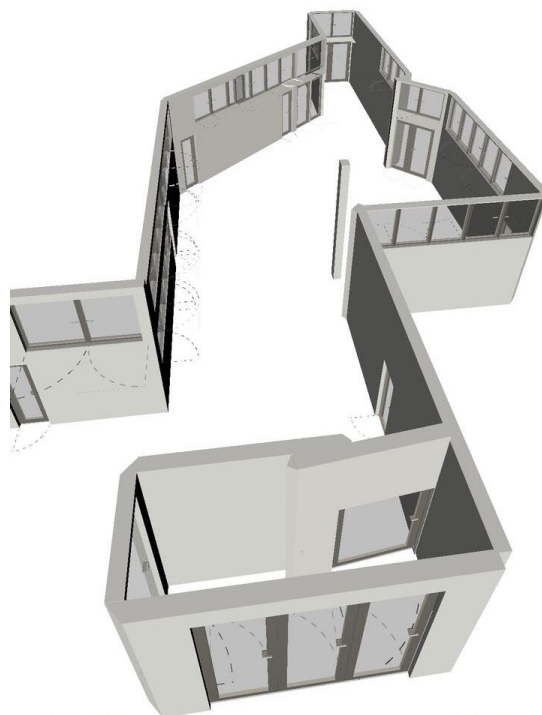


Figura 47: Captura de tela do saguão da FAUrb escaneado no pCon scan.

Fonte: Autora (2025).

### C. Reconstrução BIM

Com a aquisição dos dados concluída, iniciou-se o processo de reconstrução do modelo BIM a partir dos arquivos gerados nos escaneamentos. Como estratégia de organização, os ambientes escaneados foram agrupados conforme os níveis aos quais pertencem: térreo FAUrb, superior FAUrb, térreo PROGRAU (Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo) e superior PROGRAU.

Para preparar os dados para inserção no *Revit*, foi necessário renomear a extensão dos arquivos .eox para .zip e descompactá-los, obtendo assim os arquivos .xml com as informações estruturais. Antes de iniciar essa etapa, foi realizada uma cópia de segurança de todos os arquivos .eox, evitando a

necessidade de novo download em caso de falhas no processo. Esse processo foi feito para cada um dos 36 escaneamentos realizados.

No *Revit*, foi aberto um *template* previamente configurado com as famílias adaptativas de portas e janelas. Em seguida, foi iniciado o *Dynamo* com o arquivo mais recente contendo o *script Python* desenvolvido para automatizar a conversão dos arquivos XML em geometria BIM. O primeiro teste foi realizado com o ambiente do saguão da FAUrb, utilizando o arquivo *structure.xml*. Após a geração, o modelo foi rotacionado no *Revit* para alinhar-se com a orientação do norte do projeto. O mesmo procedimento foi repetido para os demais ambientes do térreo da FAUrb. Cada ambiente foi rotacionado e posicionado manualmente de forma precisa, com base no saguão como referência. A etapa exigiu atenção especial no encaixe das geometrias para garantir a coerência espacial do conjunto.

Com os ambientes posicionados, utilizou-se uma nuvem de pontos do escaneamento feito no modo LiDAR para verificar e ajustar os níveis reais de cada parte do edifício, definindo assim os níveis “térreo FAUrb”, “superior FAUrb”, “térreo PROGRAU” e “superior PROGRAU”.

Durante a inserção dos ambientes pertencentes a níveis diferentes do térreo da FAUrb, surgiram erros que impediram a criação automática dos elementos no nível correto. Aparentemente, as paredes conseguiam reconhecer e assumir corretamente o nível especificado, no entanto, as portas e janelas estavam sendo inseridas apenas com base nos parâmetros de altura, largura e peitoril, sem vínculo com um nível específico do projeto. Como esses elementos dependem das paredes para serem corretamente posicionados, o fato de não estarem vinculados ao mesmo nível gerava conflitos — especialmente quando a parede de referência se encontrava em um pavimento superior. Isso resultava em falhas na execução do script para esses casos. A solução adotada exigiu um ajuste no código *Python*, somando à altura do peitoril o valor correspondente à elevação do nível em questão, garantindo assim que portas e janelas fossem posicionadas corretamente mesmo em pavimentos diferentes do térreo.

#### **D. Ajustes no Modelo**

Após a inserção de todos os ambientes no modelo, foi necessário realizar uma série de ajustes para consolidar e corrigir a geometria geral da edificação. Primeiramente, foram verificados casos de sobreposição entre os escaneamentos, que foram solucionados com base na conferência de vídeos e fotos capturados durante a visita. Essa verificação permitiu identificar quais escaneamentos apresentavam maior fidelidade em relação ao ambiente real, possibilitando a escolha dos mais adequados para compor o modelo final. A partir dessas correções, os grupos foram desagrupados, consolidando todos os ambientes em um único modelo integrado.

Na sequência, os pisos foram modelados manualmente, considerando os limites reais dos ambientes e os níveis definidos anteriormente. Em função da simulação que será aplicada ao modelo, os pisos foram modelados a partir do eixo central das paredes, solução apresentada por Rodrigues (2023) para garantir a criação correta do modelo analítico. Também foram realizados ajustes manuais das esquadrias (portas e janelas), com base nas imagens de referência, a fim de alinhar corretamente sua posição e padronizar as dimensões entre os diferentes ambientes. A Figura 48 mostra o modelo final gerado unindo todos os ambientes.

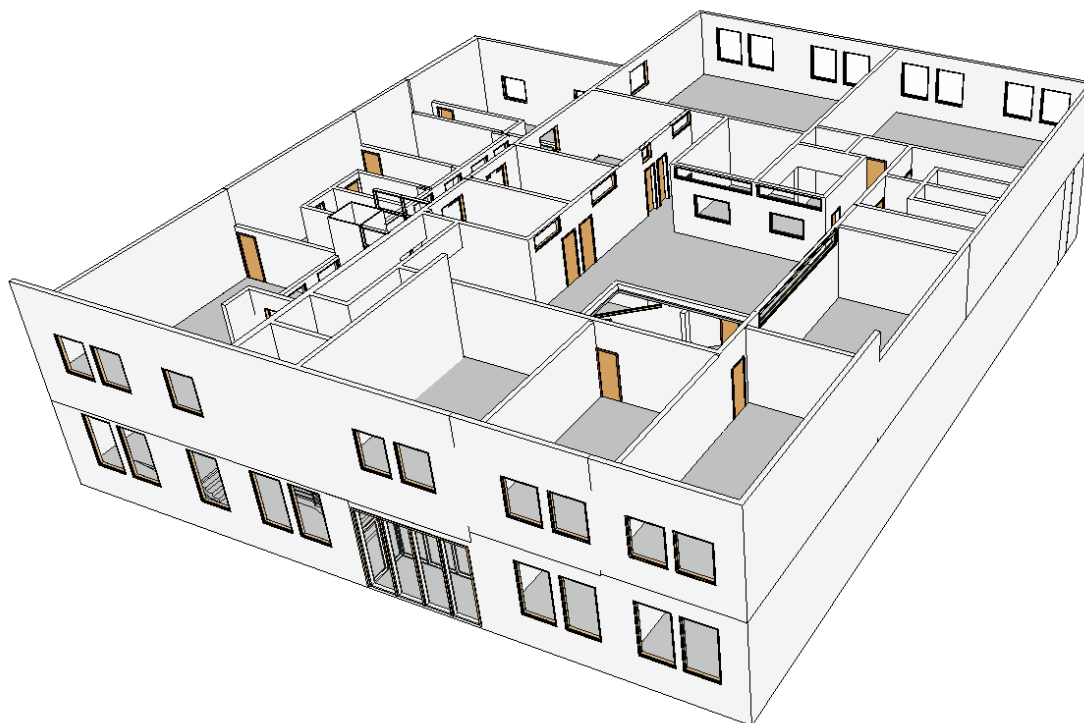


Figura 48: Modelo no *Revit* criado a partir da união dos escaneamentos feitos.

Fonte: Autora (2025).

## E. Simulação

Para viabilizar a geração do modelo analítico no *Revit*, foi necessário realizar alguns ajustes a mais no modelo, incluindo a verificação da formação de espaços fechados com delimitação adequada e a definição correta da altura de cada ambiente. Também foram ajustadas as configurações de energia do projeto para utilizar a opção de *ambientes* ou *espaços* (*Rooms or spaces*) na criação do modelo analítico, conforme recomendado por Rodrigues (2023) para uma melhor leitura dos volumes internos.

Com o modelo ajustado, é possível inserir as informações necessárias para a simulação de eficiência energética, como propriedades construtivas, uso da edificação e dados climáticos. No entanto, como essa etapa não é o foco deste trabalho, essas configurações específicas não foram realizadas. A simulação foi conduzida apenas com os parâmetros básicos gerados automaticamente pelo *Revit*, com o objetivo de verificar se o modelo é interpretado corretamente e se os relatórios de desempenho energético podem ser gerados a partir da geometria captada. A Figura 49 mostra o modelo analítico gerado a partir da modelagem feita do prédio da FAUrb.

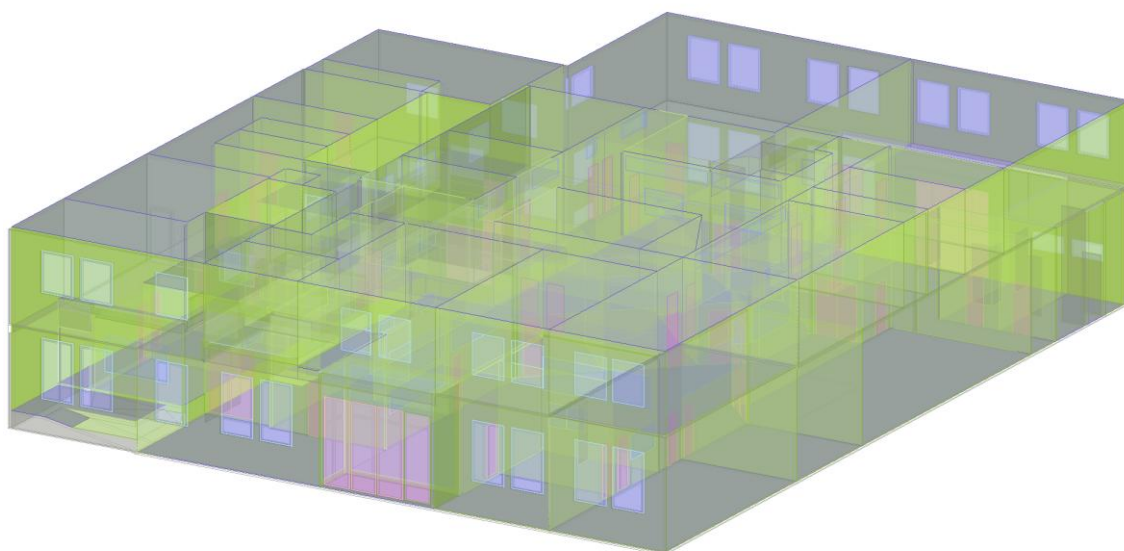


Figura 49: Modelo analítico realçando as superfícies analíticas do modelo.

Fonte: Autora (2025).

O *System Analysis* foi então executado para validar a integração entre o modelo geométrico e a ferramenta de simulação, resultando em relatórios genéricos, sem valor técnico final, mas suficientes para avaliar a viabilidade do processo como um todo. A Figura 50 apresenta o resultado do Relatório de Análise gerado, dentro do próprio *Revit*.

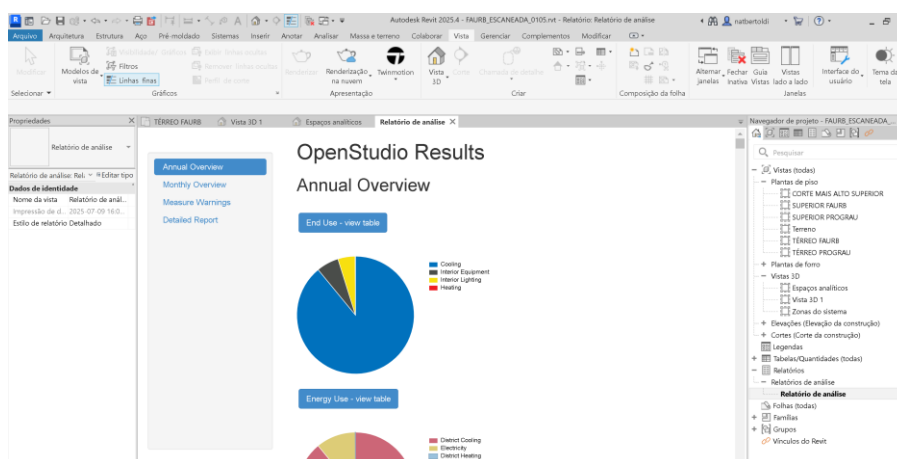


Figura 50: Captura de tela do *Revit* mostrando como aparecem os Relatórios de Análise gerados pelo *System Analysis*.

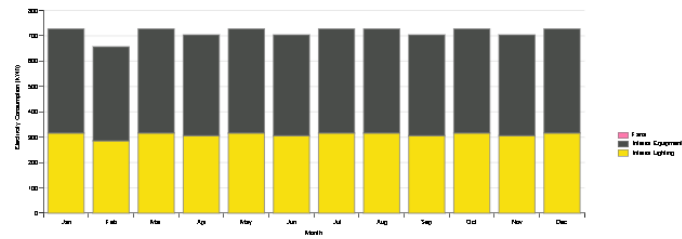
Fonte: Autora (2025).

O relatório gera gráficos e informações referentes ao desempenho da edificação, como ilustrado na Figura 51. Cabe destacar que, nesta etapa, não se buscou a inserção de dados exatos para o cálculo nem a interpretação crítica dos resultados apresentados, mas sim evidenciar que o fluxo adotado possibilita a obtenção de uma análise abrangente e detalhada, contendo diferentes parâmetros de desempenho.

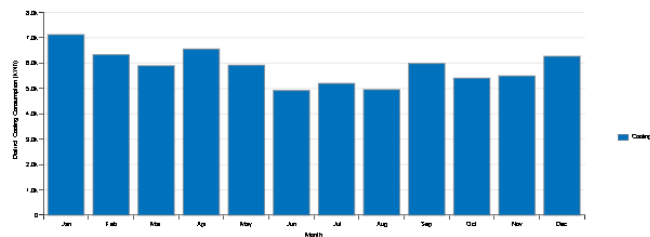


## Monthly Overview

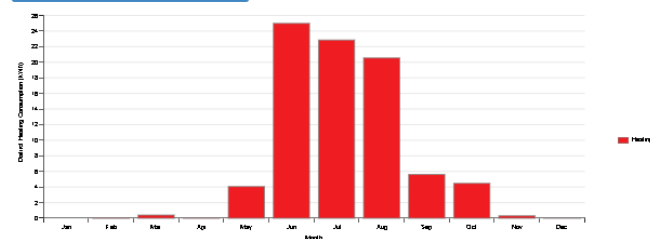
Electricity Consumption (kWh) - view table



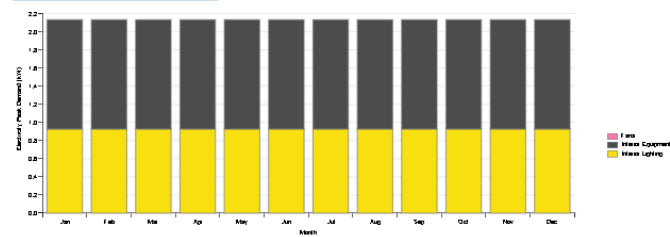
District Cooling Consumption (kWh) - view table



District Heating Consumption (kWh) - view table



Electricity Peak Demand (kW) - view table



District Cooling Peak Demand (kW) - view table

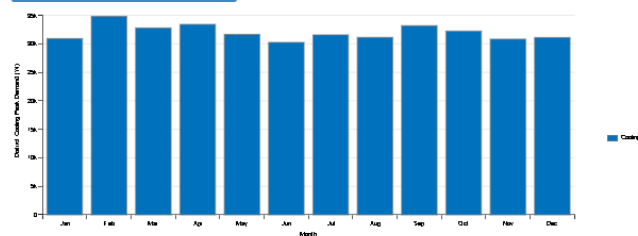


Figura 51: Alguns dos gráficos apresentados no Relatório de Análise.

Fonte: Autora (2025).

#### 4.8 Diretrizes para repetição do processo

A partir da aplicação completa do método no edifício da FAUrb, foi possível identificar um conjunto de diretrizes que devem ser consideradas para a repetição bem-sucedida do processo em outros contextos. Essas diretrizes auxiliam na organização do fluxo de trabalho e minimizam erros e retrabalhos ao longo das etapas. São elas:

1. Escolha estratégica do ambiente: Selecionar ambientes compatíveis com o objetivo do levantamento e com o nível de complexidade que o método consegue suportar. Ambientes muito fragmentados, com múltiplos níveis ou com geometrias não usuais devem ser analisados previamente quanto à viabilidade de escaneamento com o aplicativo utilizado.
2. Planejamento do percurso de escaneamento: Antes de iniciar a coleta de dados, deve-se planejar o percurso de escaneamento, considerando a posição das janelas, iluminação disponível, desníveis e possíveis obstáculos. É essencial garantir que a captação seja feita do ponto que permite a leitura mais completa da geometria, especialmente em casos com entrepisos, paredes com aberturas internas ou ambientes com pé-direito elevado.
3. Iluminação adequada dos ambientes: Ambientes escuros ou com iluminação desigual podem prejudicar o reconhecimento de elementos.
4. Escaneamento individual por ambiente: Como o aplicativo pCon.scan não possui o recurso de manter o mesmo sistema de coordenadas entre múltiplos ambientes, recomenda-se realizar o escaneamento separadamente, um a um. Para isso, é importante nomear e organizar os arquivos com clareza, facilitando a posterior inserção e posicionamento no *Revit*.
5. União dos grupos e montagem do modelo completo: Após a inserção de todos os ambientes escaneados, é necessário posicioná-los corretamente no projeto, ajustando rotações e localizações. Essa etapa visa formar um único modelo coerente, sem duplicidade de elementos.
6. Ajustes e conferência pós-modelagem: Após a geração do modelo único, é necessário revisar a volumetria, corrigindo eventuais falhas na junção de

paredes, alturas incorretas e ausência de elementos. O uso de vídeos e fotos do local como material de apoio é fundamental nesse momento.

7. Modelagem de elementos adicionais: Pisos, forros e espaços devem ser modelados manualmente a partir das paredes geradas, utilizando o eixo das paredes como base. Essa etapa garante que o modelo final esteja apto para a criação do modelo analítico necessário à simulação.

8. Verificação da formação de espaços fechados: Para que o *Revit* reconheça corretamente os volumes internos, é necessário garantir que os ambientes estejam completamente fechados e associados aos níveis corretos. Isso impacta diretamente a geração do modelo analítico.

9. Exportação e simulação: Recomenda-se utilizar o modo de espaços (spaces) para geração do modelo analítico e revisar os elementos antes da análise. Mesmo em casos onde não se configura todos os dados construtivos, o processo permite verificar a compatibilidade da geometria com as ferramentas de simulação.

10. Documentação do processo: Registrar cada etapa, ajustes realizados e dificuldades encontradas contribui para o aprimoramento do método e sua adaptação em projetos futuros, além de ser essencial para fins de pesquisa ou repetição por outros profissionais.

## 5. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo principal desenvolver e avaliar um processo capaz de transformar os dados obtidos por escaneamento com dispositivos móveis equipados com tecnologia LiDAR em modelos nativos no ambiente BIM, de modo que fossem corretamente interpretados e manipulados dentro do Revit. A etiquetagem de eficiência energética, embora de grande relevância — e destacada inclusive no título desta dissertação — não foi explorada em profundidade, uma vez que sua metodologia já se encontra mais consolidada. Ainda assim, ela representou a motivação e a finalidade que orientaram o

desenvolvimento da pesquisa, demonstrando a aplicabilidade do fluxo proposto nesse contexto. Dessa forma, a principal contribuição do trabalho está na consolidação de um método capaz de gerar modelos nativos a partir de levantamentos com LiDAR em dispositivos móveis, o que abre possibilidades de aplicação em diferentes frentes além da etiquetagem.

Apesar da crescente demanda prevista para a etiquetagem de edificações no Brasil, não havia um fluxo consolidado que automatizasse algumas das etapas envolvidas, o que gerava atrasos, retrabalho e maior custo operacional. A partir da análise de trabalhos anteriores, como o de Rodrigues (2023), identificou-se um caminho promissor que envolvia o uso do *Revit* e seus recursos para modelagem BIM, associado aos processos de simulação e etiquetagem. Buscando suprir uma lacuna identificada na etapa inicial desse processo — o levantamento de informações geométricas de forma ágil e compatível com fluxos BIM — adotou-se o método DSR para investigar a melhor forma de solucionar esse problema prático por meio do uso de tecnologias aplicadas ao levantamento arquitetônico. Ao longo da pesquisa, a proposta foi se direcionando para o escaneamento por meio de dispositivos móveis equipados com tecnologia LiDAR e, a partir daí, realizou-se a avaliação de diferentes aplicativos disponíveis, a definição do modo de escaneamento e a execução de testes para verificar a acurácia dos levantamentos e a economia de tempo em relação ao processo convencional.

O LiDAR, nesse contexto, mostrou-se capaz de fornecer técnicas mais rápidas e flexíveis de levantamento, em comparação com abordagens convencionais. O processo de transição do modelo gerado para o BIM, até então não automatizado, passou a contar com um fluxo que integra levantamento, modelagem volumétrica e preparação para análises energéticas de forma mais otimizada. O método demonstrou-se replicável, trazendo ganhos significativos em produtividade, organização e rastreabilidade dos dados, principalmente em etapas iniciais de projeto.

Os resultados indicaram que, com o uso do aplicativo *pCon.scan* aliado a rotinas em *Python* desenvolvidas para o *Dynamo* e aplicadas no *Revit*, criou-se um fluxo capaz de transformar escaneamentos simplificados em modelos BIM contendo paredes, portas e janelas geradas automaticamente. Por ser gratuito e acessível,

o *pCon.scan* apresenta grande potencial de aplicação, sobretudo em contextos onde ferramentas mais complexas ou onerosas não são viáveis. Essa abordagem permitiu reduzir o tempo de trabalho em cerca de três a quatro vezes, mantendo níveis satisfatórios de precisão e diminuindo a equipe necessária para o levantamento.

A simplificação do processo de inspeção não é apenas uma resposta a um futuro aumento da demanda por etiquetagem de edificações, mas também uma oportunidade para promover a inovação e a modernização do setor. Ao aumentar a capacidade e eficiência dos Organismos de Inspeção Acreditados (OIAS), torna-se possível abranger um maior número de edificações e garantir a eficácia da legislação. Ao facilitar o acesso à etiquetagem de eficiência energética, incentiva-se a adoção de medidas de eficiência energética e a conscientização sobre a importância da redução do consumo de energia na construção civil.

### **5.1 Limitações da pesquisa**

A avaliação do método em três frentes complementares — comparação com o processo convencional, testes em geometrias específicas e aplicação em uma edificação institucional — permitiu observar tanto os pontos fortes quanto as limitações da abordagem proposta. Dentre os principais desafios estão a falta de captura de elementos como pisos e forros, a dificuldade em escanear superfícies curvas ou paredes envidraçadas, e a impossibilidade, até o momento, de realizar escaneamentos contínuos em um mesmo sistema de coordenadas. Algumas dessas lacunas, no entanto, podem ser facilmente contornadas com planejamento de escaneamento e ajustes no Revit.

Outra limitação relevante refere-se à precisão das dimensões das esquadrias detectadas pelo sistema. Observou-se que, dependendo da quantidade de informações presentes no ambiente, da materialidade, modelo ou geometria das aberturas, a captação pode apresentar inconsistências. Por isso, recomenda-se sempre uma etapa de conferência e, se necessário, repetição do levantamento — como ocorreu em um dos testes realizados. Essa limitação, contudo, não compromete os avanços obtidos; ela apenas reforça a necessidade de atenção

crítica ao uso da tecnologia, especialmente em aplicações que exijam alto nível de acurácia.

Além disso, deve-se considerar que os aplicativos baseados em LiDAR vêm passando por constantes atualizações, o que sugere que algumas restrições observadas neste estudo poderão ser superadas em versões futuras ou por meio de ferramentas mais robustas. Nesse sentido, o fluxo aqui desenvolvido deve ser entendido como uma base flexível e adaptável, passível de aprimoramento à medida que novas tecnologias se consolidam.

Ainda assim, é importante reconhecer a dificuldade inerente ao desenvolvimento de um processo inovador em um campo ainda pouco explorado academicamente. A escassez de referências semelhantes exigiu a proposição de soluções inéditas e, ao mesmo tempo, abriu espaço para que futuras pesquisas avancem no refinamento e na validação deste método em diferentes contextos de aplicação.

## **5.2 Sugestões para trabalhos futuros**

Ainda que os resultados tenham se mostrado promissores, esta investigação permanece em aberto para o desenvolvimento de soluções ainda mais integradas e robustas. Entre as possibilidades futuras, destaca-se a análise estatística de comparação do método proposto com o método tradicional, aplicando os testes em uma amostra maior, a ampliação das ferramentas utilizadas para o escaneamento e, principalmente, o desenvolvimento de um aplicativo próprio, voltado especificamente à coleta e estruturação dos dados com foco na modelagem BIM e na etiquetagem energética. Nesse sentido, a continuidade da pesquisa já está em andamento, com a busca por financiamentos que viabilizem tais avanços.

Um aspecto com alto potencial de impacto é a possibilidade de realizar levantamentos remotos. Ao permitir que o próprio morador, técnico ou agente local realize a varredura e envie os dados para processamento automatizado em ambiente virtual, o método propõe um novo cenário não só para os projetistas, mas também para os inspetores de eficiência energética de edificações no

Brasil, especialmente em regiões distantes ou com dificuldade de acesso técnico especializado. A redução de custos, deslocamentos e tempo abre portas para uma aplicação em larga escala, contribuindo para políticas públicas mais amplas e eficientes voltadas à sustentabilidade no ambiente construído.

Embora o foco principal deste trabalho tenha sido a viabilização da etiquetagem de eficiência energética, é importante destacar que a contribuição alcançada ultrapassa esse objetivo específico. O processo desenvolvido possui relevância também para diversas outras áreas e, nesse sentido, não apenas avança na direção da etiquetagem energética, mas também abre novas possibilidades de aplicação da tecnologia em diferentes contextos profissionais e acadêmicos, ampliando o impacto de seus resultados.

Por fim, conclui-se que o método proposto é viável, replicável e promissor, representando um primeiro passo na direção de fluxos de trabalho mais inteligentes, acessíveis e integrados. A sistematização das diretrizes para repetição do processo também contribui para sua disseminação e futura adoção em diferentes contextos de projeto, ensino ou pesquisa, reforçando o caráter aberto e evolutivo da pesquisa.

## 6. REFERÊNCIAS

ABREU, Nuno; PINTO, Andry; MATOS, Aníbal; PIRES, Miguel. **Procedural Point Cloud Modelling in Scan-to-BIM and Scan-vs-BIM Applications: A Review.** ISPRS Int. J. Geo-Inf. 2023, 12, 260. <https://doi.org/10.3390/ijgi12070260>

ALLOUHI, Amine; FOUIH, Y. El; KOUSKSOU, Tarik; JAMIL, Abdelmajid; ZERAOULI, Youssef; MOURAD, Y. **Energy consumption and efficiency in buildings: current status and future trends.** Journal of Cleaner Production, Volume 109, 2015, Pages 118-130, ISSN 0959-6526, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.05.139.

ANARENE, Calistus Bengold; SAHA, Swapan; DAVIES, Peter; KAMRUL, Hassan. **Innovating Building Refurbishments: Embracing Global Digital Transformation for Today's Construction Industry.** International Journal of Scientific Research and Management (IJSRM), Volume 12, Issue 11, Pages 59-91, 2024. Doi: 10.18535/ijssrm/v12i11.cs01

APPLE. **3D Parametric Room Representation with RoomPlan.** Pesquisa em Machine Learning. Publicado em 4 out. 2022. Disponível em: <https://machinelearning.apple.com/research/roomplan>. Acesso em: 25 jun. 2025.

APPLE. **RoomPlan Framework Documentation.** Apple Developer. Disponível em: <https://developer.apple.com/documentation/roomplan/>. Acesso em: 01 jun. 2025.

APPLE. **Introducing RoomPlan.** Apple Worldwide Developers Conference, 2022. Vídeo. Disponível em: <https://developer.apple.com/videos/play/wwdc2022/10077/>. Acesso em: 01 jun. 2025.

APPLE. **Explore Object Capture and RoomPlan.** Apple Worldwide Developers Conference, 2023. Vídeo. Disponível em: <https://developer.apple.com/videos/play/wwdc2023/10192/>. Acesso em: 01 jun. 2025.



ARAGÓN, Stefany Caterine García; QUEVEDO, Orlando Villamizar. **Guía de levantamiento arquitectónico patrimonial con dispositivos móviles.** Trabalho de Graduação (Arquitetura) - Facultad de Arquitectura, Universidad La Gran Colombia, Bogotá, 2023.

ASKAR, Cigdem; STERNBERG, Harald. **Use of Smartphone Lidar Technology for Low-Cost 3D Building Documentation with iPhone 13 Pro: A Comparative Analysis of Mobile Scanning Applications.** Geomatics, v. 3, p. 563-579, 2023.

ATTIA, Shady; GRATIA, Elisabeth; HERDE, André De; HENSEN, Jan L. M. **Simulation-based decision support tool for early stages of zero-energy building design.** Energy and Buildings. 2012. Doi: 49. 2-15. 10.1016/j.enbuild.2012.01.028.

AUTODESK REVIT. **Autodesk Revit 2023.** Disponível em: <https://help.autodesk.com/view/RVT/2023/ENU>. Acesso em: 5 jan. 2023.

BAZJANAC, Vladimir. **IFC BIM-Based Methodology for Semi-Automated Building Energy Performance Simulation.** Proceedings of the 25th International Conference on Information Technology in Construction, 2008.

BRASIL. Consulta Pública nº 184 de 22/05/2025. **Resolução CGIEE Índices Mínimos de Eficiência Energética Edificações.** Disponível em: <https://consultas-publicas.mme.gov.br/home>. Acesso em 23 mai 2025.

BRASIL. Distrito Federal. Secretaria de Estado de Administração Pública. **Instrução Normativa nº 02, de 15 de julho de 2014.** Brasília: Secretaria de Estado de Administração Pública, 2014. Disponível em: [https://www.sinj.df.gov.br/sinj/Norma/77331/seap\\_int\\_02\\_2014.html#:~:text=INSTRU%C3%87%C3%83O%20NORMATIVA%20N%C2%BA%2002%2C%20DE,Federal%20das%20carreiras%20que%20menciona](https://www.sinj.df.gov.br/sinj/Norma/77331/seap_int_02_2014.html#:~:text=INSTRU%C3%87%C3%83O%20NORMATIVA%20N%C2%BA%2002%2C%20DE,Federal%20das%20carreiras%20que%20menciona). Acesso em: 27 jul. 2024.

BRASIL. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. **Portaria Inmetro nº 309, de 6 de setembro de 2022.** Aprova as Instruções Normativas e os Requisitos de Avaliação da Conformidade para a Eficiência Energética das Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas e Residenciais – Consolidado. Brasília: Diário Oficial da União. 2022.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Consulta Pública nº 184, de 22 de maio de 2025: Resolução CGIEE – Índices Mínimos de Eficiência Energética Edificações**. Brasília, DF: Ministério de Minas e Energia, 2025. Disponível em: <https://consultas-publicas.mme.gov.br/home>. Acesso em: 09 jun. 2025.

BUNGE, Mário. **Epistemologia**. São Paulo: T.A. Queiroz Editora Ltda., 1980.

CICCOZZI, Annamaria; RUBEIS, Tullio de; PAOLETTI, Domenica; AMBROSINI, Dario. **BIM to BEM for Building Energy Analysis: A Review of Interoperability Strategies**. *Energies* 2023, 16, 7845. <https://doi.org/10.3390/en16237845>

CUPERSCHMID, Ana Regina Mizrahy; NEVES DE OLIVEIRA, Gabriel; FRONER, Yacy-Ara. **Exploring the Use of LiDAR in Smartphones: Documenting the Frontispiece of Saint Francis of Assisi Church in Ouro Preto, Brazil**. *International Journal of Architectural Heritage*, 19 (9), 1397–1414. 2024. <https://doi.org/10.1080/15583058.2024.2344163>

DEZEN-KEMPTER, Eloisa; SOIBELMAN, Lúcio; CHEN, Meida; MÜLLER, Alexandre Victor. **Escaneamento 3D a laser, fotogrametria e modelagem da informação da construção para gestão e operação de edificações históricas**. *Gestão e Tecnologia de Projetos*, São Paulo, v. 10, n. 2, p. 113-124, jul./dez. 2015.

DÍAZ-VILARIÑO, Lucia; TRAN, Ha; FRÍAS, Ernesto; BALADO, Jesus; KHOSHELHAM, Kourosh. **3D mapping of indoor and outdoor environments using Apple smart devices**. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, v. XLIII-B4-2022, p. 303-308, 2022.

D.O.U. DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO. **Portaria nº 23, de 25 de abril de 2024**. Diário Oficial da União, Seção 1 ISSN 1677-7042 Nº 82, de 29 de abril de 2024. Disponível em: <https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=29/04/2024&jornal=515&pagina=23&totalArquivos=511>, Acesso em: 26 jul. 2024.

DRESCH, Aline; LACERDA, Daniel Pacheco; ANTUNES, José Antonio Valle **Design Science Research: A Method for Science and Technology Advancement**. Porto Alegre: Springer, 2014.

EASTMAN, Chuck; TEICHOLZ, Paul; SACKS, Rafael; LISTON, Kathleen. **BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors**. John Wiley & Sons, 2011.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanço Energético Nacional**, 2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/eficiencia-energetica>. Acesso em 16 jul. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. Consulta Pública nº 184, de 22 de maio de 2023 – Resolução CGIEE: **Índices Mínimos de Eficiência Energética em Edificações**. Brasília, 2023.

FALTÝNOVÁ, Martina; MATOUSKOVÁ, Eva; SEDINA, Jaroslav; PAVELKA, Karel. **Building Façade Documentation Using Laser Scanning and Photogrammetry and Data Implementation into BIM**. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Prague, Czech Republic, v. XLI-B3, p. 12-19, jul. 2016.

FICHMAN, Robert G.; SANTOS, Brian L. Dos; ZHENG, Zhiqiang. (2014) **Digital innovation as a fundamental and powerful concept in the information systems curriculum**. MIS Q 38(2):329–343

GAO, Hao; KOCH, Christian; WU, Yupeng. **Building information modelling based building energy modelling: A review**. Applied Energy, v. 238, p. 320-343, mar. 2019.

GARWOOD, Tom Lloyd; O’CONNOR, Dominic; OATES, Michael R; HUGHES, Ben Richard. **Automatic Building Geometry Creation From Point Clouds For Simulating Industrial Building Energy Use**. 4th Building Simulation and Optimization Conference, Cambridge, UK, 11-12 setembro 2018.

GOLLOB, Christoph; RITTER, Tim; KRAßNITZER, Ralf; TOCKNER, Andreas; NOTHDURFT, Arne. **Measurement of Forest Inventory Parameters with Apple iPad Pro and Integrated LiDAR Technology**. Remote Sens., v. 13, p. 3129, 2021.

HEVNER, Alan; BROCKE, Jan Vom; MAEDCHE, Alexander. **Roles of Digital Innovation in Design Science Research**. Business and Information Systems Engineering, v. 61, n. 1, p. 3–8, fev. 2019.

HEVNER, Alan; PARK, Jinsoo; MARCH, Salvatore T. (Eds.) (2004/19). **Design Science Research in Information Systems**. January 20, 2004 (created in 2004 and updated until 2015 by Vaishnavi, V. and Kuechler, W.); last updated (by Vaishnavi, V. and Petter, S.), June 30, 2019.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 16739-1:2024. Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries — Part 1: Data schema. Geneva, 2024. 408 p. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/84164.html>. Acesso em: 19 mai. 2025.

KAMEL, Ehsan; MEMARI, Ali M. **Review of BIM's application in energy simulation: Tools, issues, and solutions**. Automation in Construction, v. 97, p. 164-180, jan. 2019.

LACERDA, Daniel Pacheco; DRESCH, Aline; PROENÇA, Adriano; ANTUNES JÚNIOR, José Antonio Valle. **Design Science Research: método de pesquisa para a engenharia de produção**. Gestão & Produção, v. 20, n. 4, p. 741–761, 2013.

LAWANI, Kenneth; SADEGHINEKO, Farhad; TONG, Michael; BAYRAKTAR, Mehmethan. **Methodology for Retrospectively Developing a BIM Model from Point Cloud Scans Using Ongoing Building Project as Case Study**, 2024.

LOSÈ, Lorenzo Teppati; SPREAFICO, Alessandra; CHIABRANDO, Filiberto; TONOLO, Fabio Giulio. **Apple LiDAR Sensor for 3D Surveying: Tests and Results in the Cultural Heritage Domain**. Remote Sensing, v. 14, n. 17, p. 4157, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs14174157>. Acesso em: 29 jul. 2024.

LUETZENBURG, Gregor; KROON, Aart; BJØRK, Anders A. **Evaluation of the Apple iPhone 12 Pro LiDAR for an Application in Geosciences**. Scientific Reports, v. 11, p. 22221, 2021. doi:10.1038/s41598-021-01763-9.

MACHER, Hélène; LANDES, Tania; GRUSSENMEYER, Pierre. **From Point Clouds to Building Information Models: 3D Semi-Automatic Reconstruction of Indoors of Existing Buildings**. Applied Sciences, v. 7, n. 10, p. 1030, 2017.

MAGICPLAN. **Why Apple's LiDAR scanner opens up a brave new world of indoor mapping**. Blog Magicplan, 22 set. 2020. Disponível em: <https://blog.magicplan.app/why-apples-lidar-scanner-opens-up-a-brave-new-world-of-indoor-mapping>. Acesso em: 29 jul. 2024.

MANSON, N. J. **Is operations research really research?** Orion, v. 22, n. 2, p. 155-180, 2006. <http://dx.doi.org/10.5784/22-2-40>

MÊDA, Pedro; CALVETTI, Diego; SOUSA, Hipólito. **Exploring the Potential of iPad-LiDAR Technology for Building Renovation Diagnosis: A Case Study**. Buildings, 2023.

MELLO, Marco Antonio. **Exploração e reflexões sobre o processo de documentação as-built com uso de BIM e nuvem de pontos aplicado em edificações**. 2024. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2024.

MOYANO, Juan; NIETO-JULIÁN, Juan E.; FERNÁNDEZ-ALCONCHEL, María; ORENI, Daniela; ESTÉVES-PARDAL, Rafael. **Analysis and Precision of Light Detection and Ranging Sensors Integrated in Mobile Phones as a Framework for Registration of Ground Control Points for Unmanned Aerial Vehicles in the Scanning Technique for Building Information Modelling in Archaeological Sites**. Drones, 2023.

MUTA, Luís Filipe; SILVA, Antonio César Silveira Baptista da; CORRÊA, Luciano de Vasconcellos; SCHRAMM, Fábio Kellermann; MELO, Ana Paula. **Análise do uso de BIM na extração dos dados necessários para a avaliação de eficiência energética da INI-C**. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO. Anais [...]. Porto Alegre: ANTAC, 2022. p. 1-16.

MURTIYOSO, Arnadi; GRUSSENMEYER, Pierre; LANDES, Tania; MACHER, Hélène. **First assessments into the use of commercial-grade solid state lidar for low cost heritage documentation**. International Archives of the

Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. XLIII-B2-2, p. 599-604, 2021.

NOGUCHI, Atsushi; NAKAMURA, R.; TAKATA, Y.; MATSUO, Y.; OYA, Y.; UCHIDA, S. **Comparison and Evaluation of TLSs and Mobile LiDAR Scanners for Multi-Scale 3D Documentation of Cultural Heritage**. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. XLVIII-M-2-2023, 29th CIPA Symposium “Documenting, Understanding, Preserving Cultural Heritage: Humanities and Digital Technologies for Shaping the Future”, 25-30 June 2023, Florence, Italy. doi:10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-1135-2023.

O'DONNELL, James; TRUONG-HONG, Linh; BOYLE, Niamh; CORRY, Edward; CAO, Jun; LAEFER, Debra F. **LiDAR point-cloud mapping of building façades for building energy performance simulation**. Automation in Construction, v. 107, 2019.

OCHMANN, Sebastian; VOCK, Richard; WESSEL, Raoul; KLEIN, Reinhard. **Automatic reconstruction of parametric building models from indoor point clouds**. Comput Graph, 2016. doi:10.1016/j.cag.2015.07.008.

PAGE, David; KOSCHAN, Andreas; ABIDI, Mongi. **Methodologies and Techniques for Reverse Engineering– The Potential for Automation with 3-D Laser Scanners**. In: Raja, V., Fernandes, K.J., eds. Reverse Engineering. London, UK: Springer, 2008. p. 11-32.

PBE EDIFICA. 2024. Disponível em: <https://www.pbeedifica.com.br/conhecendo-pbe-edifica>. Acesso 25 de maio de 2024.

PBE EDIFICA. 2014. Disponível em: [https://www.pbeedifica.com.br/sites/default/files/Manual\\_Etiquetagem\\_Edificacoes\\_Publicas.pdf](https://www.pbeedifica.com.br/sites/default/files/Manual_Etiquetagem_Edificacoes_Publicas.pdf). Acesso em 14 de jun 2024.

POLYCAM. **3D Room Scanner**. Disponível em: <https://poly.cam/tools/3d-room-scanner> Acesso em: 22 jul. 2024.

RAHMANI ASL, Mohammad; BERGIN, Michael; MENTER, Adam; YAN, Wei. **BIM-based Parametric Building Energy Performance Multi-Objective Optimization**. 2014. Doi: 10.52842/conf.ecaade.2014.2.455.

RASHDI, Rabia; MARTÍNEZ-SÁNCHEZ, Joaquín; ARIAS, Pedro; QIU, Zhouyan. **Scanning Technologies to Building Information Modelling: A Review**. *Infrastructures* 2022, 7, 49. <https://doi.org/10.3390/infrastructures7040049>.

RAZALI, Muhammad I.; IDRIS, Ahmad N.; RAZALI, Muhammad H.; SYAFUAN, Wan M. **Quality Assessment of 3D Point Clouds on the Different Surface Materials Generated from iPhone LiDAR Sensor**. *International Journal of Geoinformatics*, v. 18, n. 4, p. 51-58, 2022. doi:10.52939/ijg.v18i4.2259.

ROBINSON, Stewart. **Conceptual modelling for simulation Part I: definition and requirements**. *Journal of the Operational Research Society*, v. 59, p. 278-290, 2008.

RODRIGUES, Cesar Marzullo Aguiar Centeno; SILVA, Antonio Cesar Silveira Baptista da; CUNHA, Eduardo Grala da. **Análise da ferramenta “Systems Analysis” aplicada à simulação energética de edificações**. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 19., 2022, Canela. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2022.

RODRIGUES, Cesar Marzullo Aguiar Centeno. **A tecnologia BIM como ferramenta de simulação para etiquetagem de edifícios conforme a INI-C**. 2023. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2023.

RODRIGUES, Géssica Mara. **Análise de metodologias para avaliação da eficiência energética de edificações públicas**. 2020. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Escola de Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, 2020.

ROGGERI, Simona; VASSENA, Giorgio GV; TAGLIABLU, Lavinia Chiara. **Scan-to-BIM Efficient Approach to Extract BIM Models from high Productive Indoor Mobile Mapping Survey**. *Proceedings of International Structural Engineering and Construction*, 9(1), 2022.

SACKS, Rafael; GIROLAMI, Mark; BRILAKIS, Ioannis. **Building Information Modelling, Artificial Intelligence and Construction Tech**. Developments in the Built Environment. 2020. doi: 10.1016/j.dibe.2020.100011.

SALAMANCA, Germán Franco. **El levantamiento arquitectónico: una aproximación metodológica**. Tese (Mestrado em Arquitetura) - Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2012. Disponível em: [http://artes.bogota.unal.edu.co/assets/cdm/docs/publicaciones/full/levantamiento\\_arquitectonico.pdf](http://artes.bogota.unal.edu.co/assets/cdm/docs/publicaciones/full/levantamiento_arquitectonico.pdf). Acesso em: 29 jul. 2024.

SANDERSON, Grant. **Understanding Quaternions**. YouTube, 2018. Disponível em: <https://eater.net/quaternions>. Acesso em: 29 jul. 2024.

SCHUON, Sebastian; THEOBALT, Christian; DAVIS, James; THRUN, Sebastian. **High-quality scanning using time-of-flight depth superresolution**. In: Proceedings of the 2008 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, Anchorage, AK, USA, 23–28 June 2008. IEEE, 2008. p. 1-7. DOI: 10.1109/CVPRW.2008.4563171.

SIMON, Herbert. A. **The Sciences of the Artificial**. 3rd ed. Cambridge: MIT Press, 1996.

SOPI, Jamaliah Mohamad; OMAR, Ahmad Najid; HANAFI, Mohd Hanizun. **Digital Transformation Framework For Contractors' Projects: A Comprehensive Structured Review**. International Journal of Innovation and Industrial Revolution, 6(18), 2024. 112-125.DOI:10.35631/IJIREV.618009.

TANG, Pingbo; HUBER, Daniel; AKINCI, Burku; LIPMAN, Robert; LYTLE, Alan. **Automatic reconstruction of as-built building information models from laser-scanned point clouds: A review of related techniques**. Automation in Construction, Volume 19, Issue 7, 2010, Pages 829-843, ISSN 0926-5805, doi: 10.1016/j.autcon.2010.06.007.

TEO, Tee-Ann; YANG, Chen-Chia. **Evaluating the accuracy and quality of an iPad Pro's built-in lidar for 3D indoor mapping**. Developments in the Built Environment, v. 14, 2023.



VACCA, Giuseppina. **3D Survey with Apple LiDAR Sensor—Test and Assessment for Architectural and Cultural Heritage**. *Heritage*, v. 6, n. 2, p. 1476-1501, 2023. doi:10.3390/heritage6020080.

VENABLE, John Robert. **The Role of Theory and Theorising in Design Science Research**. *DESIST*, v. 24-25, p. 1-18, 2006.

VOGT, Maximilian; RIPS, Adrian; EMMELMANN, Claus. **Comparison of iPad Pro's LiDAR and TrueDepth Capabilities with an Industrial 3D Scanning Solution**. *Technologies*, v. 9, n. 2, p. 25, 2021. doi:10.3390/technologies9020025.

VOLK, Rebekka; STENGEL, Julian; SCHULTMANN, Frank. **Building Information Modeling (BIM) for existing buildings — Literature review and future needs**. *Automation in Construction*, Volume 38, 2014, Pages 109-127, ISSN 0926-5805, doi: 10.1016/j.autcon.2013.10.023.

XU, Weili. **Final Report of 1810-RP: Development of Reference Building Information Model (BIM) Test Cases for Improving Usage of Software Interoperability Schemas**. Wexford, Pennsylvania, 2021.

YOO, Youngjin; HENFRIDSSON, Ola; LYYTINEN, Kalle. (2010) **The new organizing logic of digital innovation: an agenda for information systems research**. *Inf Syst Res* 21(4):724–735

ZEMERO, Bruno Ramos. **Análise da aplicabilidade da tecnologia BIM em projetos sustentáveis e etiquetagem de edificações no Brasil**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2016.

ZENG, Ruochen; SHI, Jonathan J.S.; WANG, Chao; LU, Tao. **Integrating as-built BIM model from point cloud data in construction projects**. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/ECAM-12-2022-1196>. Acesso em: 29 jul. 2024.

ZHANG, Shen; TANG, Yuchen; ZOU, Yiquan; YANG, Hao; CHEN, Yufei; LIANG, Jin. **Optimization of architectural design and construction with integrated BIM and PLM methodologies**. *Sci Rep* 14, 26153 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-75940-x>.