Industrialização, Digitalização, Desempenho

5º Simpósio Brasileiro de Tecnologia da Informação e Comunicação na Construção e 5º Workshop de Tecnologia de Processos e Sistemas Construtivos

FLORIANÓPOLIS-SC | 20 a 22 de agosto

[1]PROPOSTA DE UM MODELO DE DADOS BASEADO EM IFC PARA ANÁLISE DE CIRCULAÇÃO DE PESSOAS EM INTERIORES DE EDIFICAÇÕES

Proposal for an IFC Based Data Model for Indoor People Circulation Analysis

David Paulo Rodrigues de Oliveira
USP | S. Paulo, SP | david_pro@me.com

Eduardo Toledo Santos
USP | S. Paulo, SP | etoledo@usp.br

RESUMO

Atualmente, diversos formatos de dados são utilizados para dar suporte à análise e ao rastreamento de pessoas em ambientes internos. O formato IFC, por fornecer informações completas sobre o ambiente construído, seus componentes e as relações entre eles, além da descrição dos espaços, representa uma solução abrangente para essa tarefa. No entanto, a leitura direta dos dados no esquema IFC é relativamente lenta para aplicações que exigem processamento em tempo real, como o rastreamento de pessoas em circulação dentro de edificações. Dessa forma, com o objetivo de viabilizar o uso das informações do IFC para aplicações de rastreamento, este trabalho propõe uma estrutura de dados baseada em indexação espacial, capaz de acelerar o processamento do fluxo de coordenadas e detectar a localização das pessoas nos espaços definidos pelos modelos. Para avaliar o desempenho da proposta, arquivos JSON simulando fluxos de coordenadas foram processados, identificando-se a posição espacial de cada indivíduo a cada instante. Os resultados demonstraram ganhos significativos de desempenho em comparação com consultas realizadas diretamente na estrutura sequencial do IFC ou por meio de árvores BVH (Bounding Volume Hierarchy), viabilizando, assim, o uso eficiente do IFC para análises em tempo real da circulação em edifícios.

Palavras-chave: Rastreamento de pessoas, IFC, Modelo de dados, Indexação espacial.

ABSTRACT

Currently, various data formats are used to support the analysis and tracking of people in indoor environments. The IFC format, by providing comprehensive information about the built environment, its components, their relationships, and the description of spaces, represents a robust solution for this task. However, direct reading of data in the IFC schema is relatively slow for applications requiring real-time processing, such as tracking people moving within buildings. Therefore, aiming to enable the use of IFC information for tracking applications, this work proposes a data structure based on spatial indexing, capable of accelerating the processing of coordinate streams and detecting the location of individuals within the spaces defined by the models. To evaluate the performance of the proposal, JSON files simulating coordinate streams were processed, identifying the spatial position of each person at each moment. The results demonstrated significant performance gains compared to queries performed directly on the sequential IFC structure or through BVH (Bounding Volume Hierarchy) trees, thus enabling the efficient use of IFC information for real-time analysis of people circulation in buildings.

Keywords: *People tracking, IFC, Data model, Spatial indexing.*

1 INTRODUÇÃO

Diferentemente dos sistemas de suporte à navegação, que orientam o deslocamento de pessoas dentro de ambientes construídos, a análise de circulação busca compreender e avaliar esses movimentos, verificando sua conformidade com padrões predefinidos, permitidos ou recomendados para os espaços do edifício. Essa análise é realizada a partir de dados capturados por sistemas de rastreamento, enriquecidos semanticamente.

Embora informações como os espaços do edifício e suas conexões sejam essenciais para a navegação, a análise de circulação vai além, incorporando também dados sobre outros elementos que podem influenciar a avaliação dos deslocamentos, como tipos de espaço, equipamentos, elevadores, escadas, e dispositivos de segurança.

[1]OLIVEIRA, D. P. R.; SANTOS, E. T. Proposta de um Modelo de Dados Baseado em IFC para Análise de Circulação de Pessoas em Interiores de Edificações. In: 5º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO, 4., 2025, Florianópolis. **Anais [...].** Porto Alegre: ANTAC, 2025.

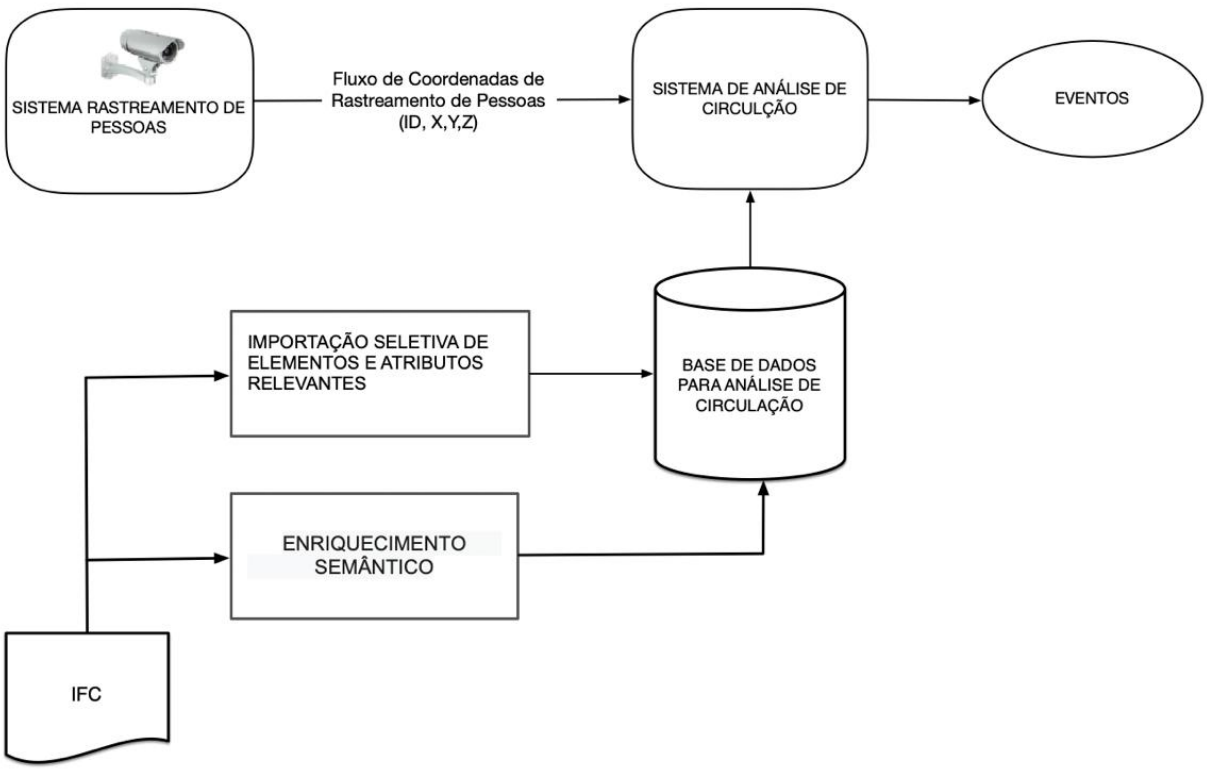
Assim, a análise de circulação constitui uma aplicação mais abrangente, ao combinar as informações típicas da navegação com dados adicionais sobre o ambiente e seus componentes, permitindo monitorar e avaliar o movimento das pessoas em relação aos padrões definidos para o edifício (Figura 1).

Diversos padrões e formatos são utilizados para representar espaços e elementos internos, sendo o IFC – *Industry Foundation Classes* (International Organization for Standardization [ISO], 2024) o mais proeminente. A representação de geometria tridimensional, bem como seu esquema orientado a objetos e semanticamente rico, associado à ampla adoção na indústria da construção, faz do IFC a escolha ideal para representar ambientes construídos.

Outros padrões menos difundidos incluem o IndoorGML (Lee; et al., 2020) e o CityGML (Kutsner; et al., 2023), ambos desenvolvidos pelo Open Geospatial Consortium (OGC), além do Indoor OpenStreetMap (OpenStreetMap, 2024).

Uma comparação desses formatos mais amplamente adotados para representar ambientes internos, em relação a sete critérios, destacou os formatos IFC, CityGML LoD 4 e IndoorGML como tendo esquemas de dados bem definidos e forte poder expressivo. Com exceção do OpenStreetMap, que carece de qualquer padronização real e, portanto, do interesse da comunidade nessa iniciativa, todos os padrões mencionados são categorizados como de baixa eficiência, devido ao tamanho e à quantidade de dados disponibilizados (Li et al., 2019) .

Figura 1: fluxo de dados do sistema de análise de circulação.



Fonte: Os autores.

Dessa forma, por fornecer informações mais completas sobre o ambiente construído, seus componentes e propriedades — incluindo a estrutura, os espaços e seus usos previstos — e por ser cada vez mais adotado no setor da construção civil globalmente, o IFC se configura como um padrão altamente adequado aos propósitos desta pesquisa. Por essas razões, optou-se pela extração de informações a partir de arquivos IFC, buscando maior aplicabilidade, flexibilidade e eficiência na aplicação de análise de circulação.

Entretanto, a leitura direta dos dados no esquema IFC é relativamente lenta para aplicações que exigem

processamento em tempo real, como o rastreamento de pessoas em circulação dentro de edificações, por exemplo. Dessa forma, com o objetivo de viabilizar o uso das informações do IFC para aplicações de rastreamento, este trabalho propõe uma estrutura de dados baseada em indexação espacial, capaz de acelerar o processamento do fluxo de coordenadas e detectar a localização das pessoas nos espaços definidos pelos modelos.

Outras pesquisas (Eftekharirad; Nik-Bakht; Hammad, 2018; Feng *et al.*, 2021; Marroquin; Dubois; Nicolle, 2018, 2019; Rueppel; Stuebbe, 2008; Zhou *et al.*, 2025) tiveram objetivos tangencialmente ligados ao tema aqui tratado, mas não foi identificado nenhuma publicação com a mesma meta.

2 METODOLOGIA

A metodologia desta pesquisa segue as etapas propostas pela Design Science Research (DSR) (Dresch; Lacerda; JR, 2021). Além da identificação e conscientização do problema, abordadas sucintamente na introdução deste artigo, são apresentados, como parte da proposição de artefatos para a sua resolução — conforme previsto pela DSR — tanto artefatos de modelo quanto um artefato de instanciação, além das heurísticas de construção. Esses artefatos são descritos a seguir:

- Artefatos de modelo: consistem no detalhamento do fluxograma e dos diagramas do sistema proposto, apresentados ao longo deste artigo, especialmente na seção 2.1, que descreve o modelo de dados desenvolvido.

- Artefato de instanciação: envolve o desenvolvimento dos módulos que compõem a implementação utilizada para avaliar a performance do modelo baseado em indexação espacial R-Tree. Este artefato é descrito em detalhes na seção 3.2, que trata da implementação criada para testar o desempenho do sistema proposto.

Além disso, são apresentadas as heurísticas de construção, que incluem as abordagens e técnicas empregadas na elaboração do artefato de instanciação, descritas de forma resumida.

A avaliação dos artefatos de modelo (estrutura de dados e algoritmos) foi realizada por meio do artefato de instanciação, implementado em Python. Esta implementação abrange tanto o algoritmo proposto para extração do espaço correspondente às coordenadas X, Y, Z das pessoas rastreadas, quanto outros métodos utilizados para fins comparativos de desempenho.

Para tal, foi gerado um fluxo de dados simulado, no formato JSON, representando o rastreamento de pessoas, a fim de permitir a medição do tempo de processamento necessário para determinar o espaço associado a cada conjunto de coordenadas. A seção 3.2, adiante neste artigo, detalha esse processo de avaliação, bem como as técnicas envolvidas.

Por fim, a etapa de Explicitação das Aprendizagens e Conclusão é apresentada no capítulo 3 – Resultados e no capítulo 4- Discussão, incluindo também uma possível generalização para uma classe mais ampla de problemas em 5- Conclusões.

3 RESULTADOS

3.1 Modelo de dados proposto para identificação de espaços a partir de coordenadas de rastreamento absoluto

Considerando os objetivos da análise da circulação de pessoas, o modelo de dados proposto deve, como requisito fundamental, permitir a identificação do espaço do edifício em que uma pessoa se encontra, com base exclusivamente em suas coordenadas x, y, z obtidas a partir de um sistema de rastreamento.

Essa identificação pode ser realizada diretamente no modelo descrito no IFC, por meio de algoritmos de busca como as funções baseadas na Bounding Volume Hierarchy (BVH) do IfcOpenShell (IfcOpenShell, 2024).

Alternativamente, pode-se utilizar estruturas de dados especialmente geradas para esse fim, extraídas do modelo IFC, conforme proposto nesta pesquisa.

O modelo desenvolvido define uma estrutura extraída do modelo IFC que permite identificar, de forma mais eficiente, o espaço ocupado pela pessoa a partir das coordenadas captadas pelo rastreamento.

Para acelerar essa busca, o modelo proposto adota três etapas sequenciais, que utilizam dados extraídos do IFC (ver Quadro 1), conforme descrito a seguir:

Etapa 1: Identificação do piso com base na coordenada Z rastreada. Esta etapa opera diretamente sobre a lista andarCoords, permitindo acelerar a busca na R-Tree associada ao respectivo piso.

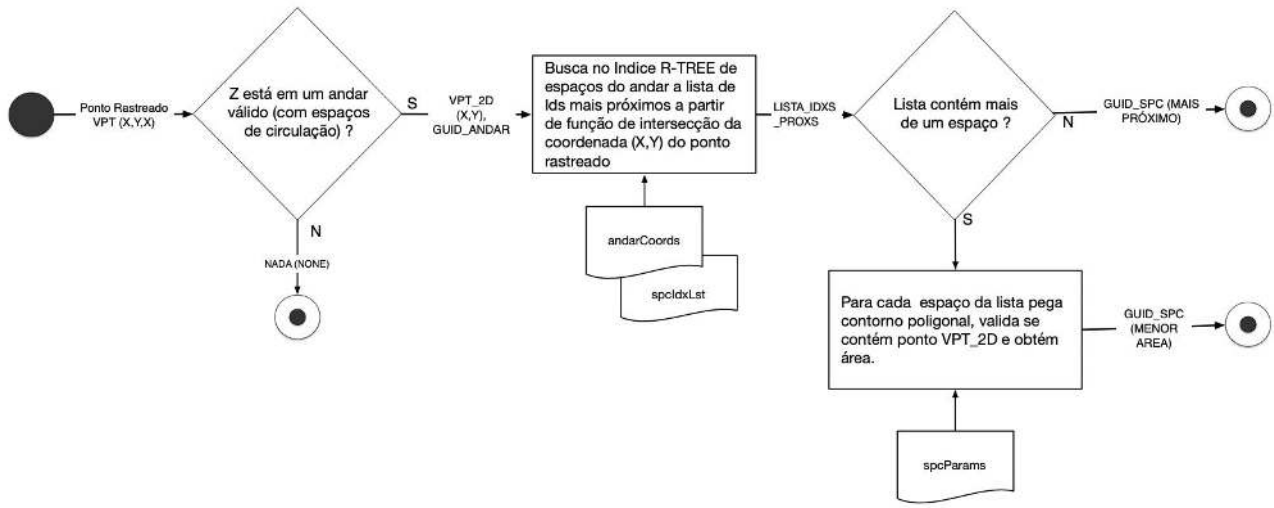
Etapa 2: Utilização de uma R-Tree* (Beckmann; et al., 1999), uma versão otimizada da estrutura R-Tree (Guttman, 1984), para realizar rapidamente a busca pelo espaço ou pelo conjunto de espaços candidatos às coordenadas rastreadas.

Etapa 3: Quando múltiplos espaços são retornados pela etapa anterior, realiza-se um refinamento utilizando algoritmos de geometria computacional para determinar a inclusão do ponto em um polígono. Neste trabalho, foram aplicadas funções específicas para a análise de objetos geométricos planares.

A Figura 2 apresenta o fluxograma que sintetiza essas etapas, bem como os dados utilizados em cada uma delas.

O modelo emprega quatro listas de dados, sendo três delas compostas por identificadores. Em Python, essas estruturas são implementadas como dicionários, capazes de armazenar dados simples, listas ou outros dicionários, organizados por chaves.

Figura 2 Fluxograma da extração otimizada de localização espacial a partir de coordenadas de rastreamento



Fonte: os autores

O quadro 1 descreve as estruturas de dados utilizadas no modelo.

Quadro 1: Estruturas de dados utilizadas no sistema proposto

IDENTIFICAÇÃO	DESCRIÇÃO DO CONTEÚDO	EXEMPLO DE CONTEÚDO	USO NO MODELO
andarCoords	Dicionário com as chaves GUID das entidades de andar, onde cada chave GUID	{Nome: 'Primeiro Andar', 'Zmin': 0.0, 'Zmax': 4.57, 'RtreeIdx':	Identificação do espaço a partir das

IDENTIFICAÇÃO	DESCRIÇÃO DO CONTEÚDO	EXEMPLO DE CONTEÚDO	USO NO MODELO
	contém um dicionário com as chaves: Nome: String - ID do Andar Zmin: Float - Coordenada de elevação inferior do Andar ZMax: Float - Coordenada de elevação superior do Andar RTreeIdx: <Object> - Estrutura RTREE dos contornos dos espaços no andar. Informação usada para identificar o intervalo de coordenadas de elevação do piso e pesquisar rapidamente o espaço a partir de uma coordenada X,Y no piso usando a estrutura de dados RTree.	rtree.index.Index(bounds=[-52.013, -0.113, 0.246, 56.253], size=153) {'Nome': 'Segundo Andar', 'Zmin': 4.57, 'Zmax': 9.25, 'RtreeIdx': rtree.index.Index(bounds=[-52.013, -0.113, 0.113, 56.253], size=109)}	coordenadas absolutas rastreadas.
spcCoords	Dicionário com as chaves dos GUIDs das entidades de andar do edifício, onde cada chave contém um dicionário de dados com GUIDs dos espaços pertencentes ao andar. Cada GUID de espaço aponta para uma lista de arrays de coordenadas x,y dos vértices que definem a pegada do espaço no plano z=0 do Andar.	{'0ztdC3L1HAzhbhMHypqcha': array([[-19.83 , 36.535],[-19.83 , 42.156], [-18.058, 42.156],[-18.055, 42.156], [-18.055, 37.192], [-15.32 , 37.192], [-15.32 , 35.178], [-15.32 , 35.01], [-19.83 , 35.01], ... [-20.166, 36.535]]), '0ztdC3L1HAzhbhMHypqchZ': array([[-18.12 , 47.142], ... [-18.12 , 44.052], [-18.12 , 42.28], [-19.83 , 42.28],...}	Refinamento da identificação do contorno espacial.
spcParams	Dicionário com as chaves GUID das entidades “espaço”. Cada chave GUID contém uma lista das seguintes propriedades dos espaços: Floor: GUID do andar onde o espaço está localizado. Space Use ID: Para distinguir entre espaços de circulação, espaços de transporte vertical e outros. Lista com a matriz de coordenadas x,y dos vértices do contorno do espaço no plano z=0 do andar.	{'1hYh2kkNaHxvXGF7m$V1c3': {'Andar': '3ONSS_ia4HxvXEF7m$V1c3', 'Area': 7.85}, 'Vertices': array([[-1.5 , -4.6], [-1.5 , -1.708], [1.5 , -1.708], [1.5 , -4.6], [-1.5 , -4.6]]),...	Pesquisa rápida do espaço e dos limites do seu perímetro com base em seu GUID e área.
spcIdxLst	Lista dos GUIDs dos espaços, ordenada conforme o ID da R-Tree..	['1NvbzFDrT8ePCfWUZHOCVS', '0ztdC3L1HAzhbhMHypqbH5', '0ztdC3L1HAzhbhMHypqcha', '0ztdC3L1HAzhbhMHypqchZ',...]	Usado pelo algoritmo de localização de rastreamento para identificar o espaço da Pesquisa RTree.

Fonte: os autores.

3.2 Avaliação de desempenho das estruturas de dados propostas e métodos de busca

Para avaliar o desempenho do modelo proposto, fluxos simulados de rastreamento de pessoas foram gerados em arquivos JSON, a partir de diferentes modelos BIM. Esses fluxos, que simulam dados passíveis de serem obtidos a partir de sistemas de rastreamento de pessoas, foram processados por um programa de teste, implementado na linguagem Python (Python Software Foundation, 2021). Esse programa reproduziu o uso da estrutura de dados e do algoritmo propostos, além de outros algoritmos distintos para extrair, a partir dessas informações, a localização do espaço no modelo da edificação.

A implementação utiliza diversos pacotes Python para diferentes finalidades, incluindo importação e processamento de modelos em IFC, manipulação de objetos geométricos planares, entre outros, conforme listado no Quadro 2.

Os arquivos JSON usados na avaliação foram gerados por outro programa, também implementado em Python, responsável por criar coordenadas de posições aleatórias simulando pessoas rastreadas dentro dos espaços de cada modelo de construção testado, em um dado instante, registrado como um número de timestamp.

Quadro 2: Pacotes e módulos Python usados na implementação

PACOTE PYTHON	DESCRIÇÃO	USO NA IMPLEMENTAÇÃO	REFERÊNCIAS
R-Tree	Wrapper Ctypes Python da libspatialindex, uma biblioteca que provê estruturas robustas de indexação espacial, incluindo R*-Tree, MVR-Tree e TPR-Tree.	Implementa a indexação espacial R-Tree usada no método de busca espacial proposto.	rtree wrapper: https://pypi.org/project/Rtree/ libspatialindex: https://libspatialindex.org/en/latest/
IfcOpenShell	API C++ e Python para importação de esquemas, tesselamento e processamento de geometria implícita, com suporte aos formatos IFC2X3, IFC4 e IFC4.3.	Utilizado em todas as operações de importação de entidades, propriedades e atributos IFC, bem como funções BVH para busca baseada em coordenadas diretamente nos dados IFC..	https://docs.ifcopenshell.org/
Matplotlib	Biblioteca para criar visualizações estáticas, animadas e interativas em Python	Usado para verificar se as coordenadas de um ponto estão dentro de um polígono no método "Sequencial + Ponto em Polígono".	https://matplotlib.org/
Shapely	Pacote para manipulação e análise de objetos geométricos planos.	Utilizado para extração das projeções 2D (*footprints*) das geometrias 3D em plantas baixas, áreas poligonais e caixas delimitadoras.	https://shapely.readthedocs.io/en/stable/

Fonte: os autores.

Os arquivos de simulação em JSON possuem a seguinte estrutura de dados:

```
{
  tstp_a: {
    ID_Pessoa_1: [x, y, z, "GUID do espaço"],
    ID_Pessoa_2: [x, y, z, "GUID do espaço"],
    ...,
    ID_Pessoa_n: [x, y, z, "GUID do espaço"]
  },
  ...,
  tstp_z: {
    ID_Pessoa_1: [x, y, z, "GUID do espaço"],
    ...
  }
}
```

Onde:

- tstp_<x>: o número de timestamp do instante de rastreamento das pessoas;
- ID_Pessoa_<i>: número único de identificação da pessoa gerado pelo sistema de rastreamento;
- [x,y,z, GUID do Espaço]: lista das coordenadas x, y, z da pessoa rastreada na data e hora registradas no timestamp tstp, além do GUID do espaço onde as coordenadas foram geradas.

O identificador GUID do espaço serve para uma verificação cruzada, validando a fidelidade dos resultados obtidos pelo sistema de análise proposto, exclusivamente para aferição da precisão de cada método avaliado. Abaixo apresenta-se um exemplo deste fluxo com dados de rastreamento simulados extraídos de um dos modelos IFC testados:

```
{
  "1602876300.0": {
    "ttime": 1602876300.0,
    "P1": [-10.485, 34.258, 0.0, "0ztdC3L1HAzhbhMHypqbH5"],
    "P2": [-14.362, 28.995, 0.0, "0ztdC3L1HAzhbhMHypqbH5"],
    "P3": [-2.351, 28.475, 0.0, "0ztdC3L1HAzhbhMHypqbH5"],
    ...
  }
}
```

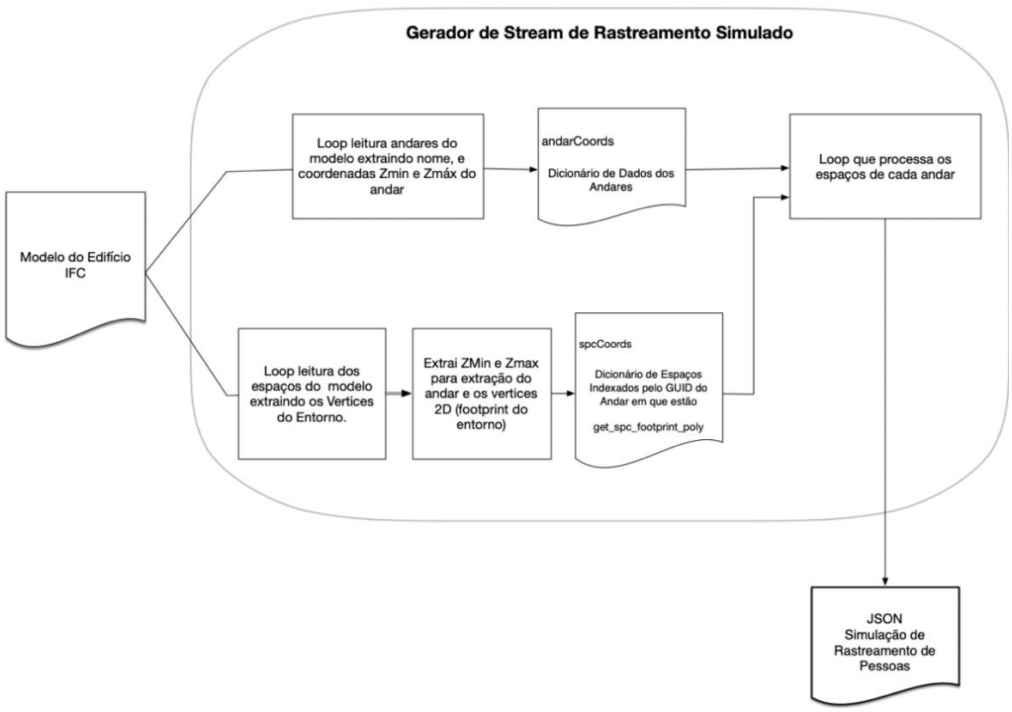
O modelo proposto assume que apenas o registro de data e hora, o ID da pessoa e a lista de coordenadas x, y, z são fornecidos pelo sistema de rastreamento. Todas as demais informações, como edifício, andar e espaço, são extraídas pelo Sistema de Análise de Circulação, a partir das coordenadas processadas no banco de dados.

Diversos sistemas são descritos na literatura para rastreamento de pessoas em ambientes internos (Asaad; Maghdid, 2022; Duque Domingo *et al.*, 2017; Huang *et al.*, 2021; Morar *et al.*, 2020; Munaro; Basso; Menegatti, 2016). Contudo, tais sistemas não constituem o foco desta pesquisa.

Vale destacar que, embora o sistema de rastreamento possa facilmente relatar o edifício e o andar onde as pessoas se encontram, derivando essas informações da localização da câmera ou sensor, isso pode impor restrições operacionais, exigindo configurações adicionais. Por exemplo, sensores como câmeras de profundidade podem captar pessoas transitando entre diferentes andares ou subindo rampas e escadas, gerando ambiguidade quanto ao piso onde a pessoa se encontra.

Assim, o sistema aqui proposto também extrai, a partir das coordenadas x, y, z de cada pessoa rastreada, o andar e o identificador do edifício, como previsto no modelo de dados. A Figura 3 apresenta o fluxograma utilizado para gerar o fluxo de rastreamento simulado em JSON, para fins de avaliação do desempenho do modelo.

Figura 3: Fluxograma de geração do fluxo de coordenadas simulado para avaliação da estrutura proposta de dados



Fonte: os autores.

A Tabela 1 resume as características de cinco modelos IFC distintos utilizados na avaliação de desempenho do algoritmo proposto. Estes modelos foram criados em diferentes ferramentas de autoria BIM e exportados nos esquemas IFC 2x3 ou IFC4.

Tabela 1: Características dos modelos de teste para avaliação de desempenho

MODELO	TIPO DE USO	IFC SCHEMA	PLATAFORMA DE MODELAGEM	QTD ESPAÇOS	QTD. DE ANDARES COM CIRCULAÇÃO	ESPAÇOS / ANDAR	QTD. PESSOAS RASTREADAS	PESSOAS / ANDAR
CLINIC 2016	Clinica Médica	2x3	REVIT	269	4	67,3	402	100,5
S-LIFE EXPRESS	Residencial Comercial	4	ARCHICAD	1981	20	99,1	3675	183,8
STACKED TOWER	Residencial	4	ARCHICAD	263	23	11,4	462	20,1
ARBOLEDA	Residencial	2X3	VECTORWORKS	385	14	27,5	386	27,6
ESPLANADES	Residential	2x3	ARCHICAD	285	5	57,0	452	90,4

Fonte: os autores.

Para mensurar o tempo de processamento de cada método avaliado, foi utilizada a função process_time() do módulo time do Python, que retorna, como valor float (em segundos fracionários), a soma do tempo de CPU do sistema e do usuário do processo corrente. A medição foi realizada imediatamente antes e após a execução da função de busca espacial de cada método avaliado.

Embora o valor retornado já exclua o tempo de suspensão (*sleep*), para reduzir a interferência de outros processos, cada teste foi repetido em um loop com seis iterações. A primeira iteração foi descartada, a fim de eliminar efeitos de latência inicial no carregamento das estruturas de dados. O tempo médio decorrido nas cinco iterações subsequentes foi considerado para análise.

Além do tempo decorrido, o programa de teste registrou o número de vezes em que o algoritmo baseado em R*-Tree retornou múltiplos espaços candidatos (Tabela 2), exigindo assim a verificação redundante, conforme ilustrado na Figura 2, resultando em um tempo de processamento superior nesses casos.

Os experimentos foram realizados em um computador MacBook Pro com processador Apple M2 Pro.

4 DISCUSSÃO

A Tabela 2 apresenta os resultados da análise de posicionamento, conduzida exclusivamente para identificar o espaço correspondente a cada ponto rastreado nos arquivos JSON, utilizando o fluxo simulado para cada modelo testado, conforme a formatação e a metodologia descritas anteriormente.

A diferença de desempenho ao utilizar o modelo de dados proposto — referido na tabela como "R-Tree" — é significativa, com ganhos de, no mínimo, o dobro da velocidade. Esse diferencial é ainda mais expressivo em modelos que apresentam uma maior proporção de espaços por andar. Conforme indicado na Tabela 2, os ganhos de velocidade proporcionados pelo modelo baseado em R*-Tree podem alcançar até cerca de 20 vezes mais rapidez, em comparação ao algoritmo sequencial tradicional utilizado para a busca e localização de pontos dentro dos polígonos que delimitam os espaços.

Esses resultados evidenciam a vantagem da utilização da indexação espacial R*-Tree para pesquisas dentro de espaços localizados no mesmo andar. No entanto, quando o modelo contém uma quantidade elevada de espaços sobrepostos ou circundantes, esse fator pode reduzir o diferencial de desempenho da abordagem com R*-Tree. Isso ocorre porque, conforme demonstrado no algoritmo proposto (Figura 2), é necessária uma etapa adicional para confirmar se o ponto rastreado está efetivamente contido dentro do polígono delimitador do espaço ou, em casos de sobreposição, para determinar o espaço com a menor área.

Esse impacto é claramente observado no modelo "S-Life Express", que possui uma proporção maior de espaços por andar do que o modelo "Clinic", mas apresenta diversas situações de sobreposição ou cercamento entre espaços, afetando 1.059 pontos rastreados. Isso forçou o algoritmo a realizar verificações adicionais nos espaços candidatos retornados pela pesquisa de índice espacial R*-Tree, por meio da função

contains_point() do módulo path do Matplotlib. Tal operação introduziu um custo computacional extra, resultando em maior latência. Situação semelhante ocorreu no modelo "Stacked Tower", que apresentou 311 pontos rastreados dentro de espaços sobrepostos, o que também comprometeu o desempenho do algoritmo proposto.

A porcentagem de pontos rastreados que caem dentro dessas áreas sobrepostas influencia diretamente o valor do indicador "Tempo por Ponto Rastreado" (Time/Tracked Point).

Importante destacar que, mesmo nos cenários caracterizados por elevada incidência de sobreposição ou cercamento de espaços, o ganho de velocidade proporcionado pelo algoritmo baseado em R*-Tree se manteve, no pior caso, ao menos duas vezes superior em relação ao algoritmo sequencial.

Tabela 2: Tempos de processamento para algorítmos e modelos testados

MODELO	# PONTOS RASTREADOS CAINDO DENTRO DE ESPAÇOS SOBREPOSTOS OU CERCADOS	% PONTOS EM ESPAÇOS SOBREPOSTOS/ CERCADOS	TEMPO TOTAL (SEQ + Point in Poly) (ms)	TEMPO TOTAL (BVH - 2D) (ms)	TEMPO TOTAL (BVH - 3D) (ms)	TEMPO TOTAL (RTREE) (ms)	TEMPO / PONTO RASTREADO (ms)	FATOR DE GANHO DE VELOCIDADE (RTREE x SEQ)
CLINIC 2016	135	34%	177	1341	1461	9	0,022	19,7
S-LIFE EXPRESS	1059	29%	1274	74294	86178	85	0,023	15,0
STACKED TOWER	311	67%	22	2089	2096	11	0,024	2,0
ARBOLEDA	75	19%	38	312	332	7	0,018	5,4
ESPLANADES	313	69%	122	427	437	12	0,027	10,2

Fonte: os autores

5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste estudo demonstram de forma clara a eficácia do modelo de dados proposto, baseado em estruturas de indexação espacial R*-Tree, para a identificação eficiente de espaços em fluxos de rastreamento de pessoas integrados a modelos BIM. A análise revelou ganhos de desempenho expressivos, especialmente em modelos com alta densidade de espaços por andar, com tempos de processamento até 20 vezes mais rápidos em comparação com o método sequencial tradicional.

Mesmo em cenários desafiadores, caracterizados por sobreposições e cercamentos espaciais, o modelo manteve desempenho superior, alcançando no pior caso um tempo de processamento pelo menos duas vezes mais eficiente que o método sequencial. A capacidade de lidar com tais complexidades, preservando a acurácia na identificação dos espaços, confirma a robustez e aplicabilidade da abordagem proposta.

Este estudo, portanto, fornece evidências relevantes para a adoção de estruturas baseadas em R*-Tree em sistemas de análise de circulação apoiados por modelos BIM, contribuindo para o avanço de soluções mais escaláveis e eficientes em ambientes construídos complexos. Pesquisas futuras podem explorar a aplicação do modelo em contextos reais, com dados obtidos a partir de sistemas de rastreamento implementados, bem como avaliar a integração com outras técnicas de otimização especial.

REFERÊNCIAS

ASAAD, S. M.; MAGHDID, H. S. A comprehensive review of indoor/outdoor localization solutions in IoT era: Research challenges and future perspectives. **Computer Networks**, [*s. l.*], v. 212, p. 109041, 2022.

BECKMANN, N.; ET AL. The R*-tree: An Efficient and Robust Access Method for Points and Rectangles. *In*: ACM, 1999. **Anais [...]**. [*S. l.: s. n.*], 1999.

DRESCH, A.; LACERDA, D. P.; JR, J. A. V. A. **Design science research: método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia**. [*S. l.*]: Bookman, 2021.

DUQUE DOMINGO, J. *et al.* An Improved Indoor Positioning System Using RGB-D Cameras and Wireless Networks for Use in Complex Environments. **Sensors**, [*s. l.*], v. 17, n. 10, p. 2391, 2017. Disponível em: https://www.mdpi.com/1424-8220/17/10/2391. Acesso em: 6 mar. 2025.

EFTEKHARIRAD, R.; NIK-BAKHT, M.; HAMMAD, A. Extending IFC for Fire Emergency Real-Time Management Using Sensors and Occupant Information. *In*: 34TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON AUTOMATION AND ROBOTICS IN CONSTRUCTION, 2018, Taipei, Taiwan. **Anais [...]**. Taipei, Taiwan: [*s. n.*], 2018. Disponível em: http://www.iaarc.org/publications/2018_proceedings_of_the_35th_isarc/extending_ifc_for_fire_emergency_real_time_management_using_sensors_and_occupant_information.html. Acesso em: 6 jun. 2025.

FENG, Y. *et al.* A BIM-Based Coordination Support System for Emergency Response. **IEEE Access**, [*s. l.*], v. 9, p. 68814–68825, 2021. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/9422804/. Acesso em: 6 jun. 2025.

GUTTMAN, A. R-Trees: A Dynamic Index Structure for Spatial Searching. *In*: ACM, 1984. **Anais [...]**. [*S. l.: s. n.*], 1984.

HUANG, X. *et al.* Indoor Detection and Tracking of People Using mmWave Sensor. **Journal of Sensors**, [*s. l.*], v. 2021, n. 1, p. 6657709, 2021. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2021/6657709. Acesso em: 6 mar. 2025.

IFCOPENSHELL. [*S. l.*], 2024. Disponível em: https://docs.ifcopenshell.org/introduction.html. Acesso em: 16 dez. 2024.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION [ISO]. ISO 16739:2024 Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries - Part 1: Data schema. [*s. l.*], 2024.

KUTSNER, T.; ET AL. OGC City Geography Markup Language (CityGML) - Part 2: GML Encoding Standard. [*s. l.*], 2023.

LEE, J.; ET AL. OGC INDOORGML 1.1 – STANDARD Implementation. [*s. l.*], 2020.

LI, K.-J. *et al.* Survey on Indoor Map Standards and Formats. *In*: 2019 INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDOOR POSITIONING AND INDOOR NAVIGATION (IPIN), 2019, Pisa, Italy. **2019 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)**. Pisa, Italy: IEEE, 2019. p. 1–8. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/8911796/. Acesso em: 7 mar. 2025.

MARROQUIN, R.; DUBOIS, J.; NICOLLE, C. Ontology for a Panoptes building: Exploiting contextual information and a smart camera network. **Semantic Web**, [*s. l.*], v. 9, n. 6, p. 803–828, 2018. Disponível em: https://journals.sagepub.com/doi/full/10.3233/SW-180298. Acesso em: 16 mar. 2025.

MARROQUIN, R.; DUBOIS, J.; NICOLLE, C. WiseNET: An indoor multi-camera multi-space dataset with contextual information and annotations for people detection and tracking. **Data in Brief**, [*s. l.*], v. 27, p. 104654, 2019. Disponível em: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352340919310091. Acesso em: 27 fev. 2025.

MORAR, A. *et al.* A Comprehensive Survey of Indoor Localization Methods Based on Computer Vision. **Sensors**, [*s. l.*], v. 20, n. 9, p. 2641, 2020. Disponível em: https://www.mdpi.com/1424-8220/20/9/2641. Acesso em: 6 mar. 2025.

MUNARO, M.; BASSO, F.; MENEGATTI, E. OpenPTrack: Open source multi-camera calibration and people tracking for RGB-D camera networks. **Robotics and Autonomous Systems**, [*s. l.*], v. 75, p. 525–538, 2016. Disponível em: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921889015002304. Acesso em: 6 mar. 2025.

OPENSTREETMAP. [*S. l.*], 2024. Disponível em: https://www.openstreetmap.org. Acesso em: 16 dez. 2024.

PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. **Python Documentation contents — Python 3.10.16 documentation**. [*S. l.*], 2021. Disponível em: https://docs.python.org/3.10/contents.html. Acesso em: 16 dez. 2024.

RUEPPEL, U.; STUEBBE, K. M. BIM-based indoor-emergency-navigation-system for complex buildings. **Tsinghua Science and Technology**, [*s. l.*], v. 13, n. S1, p. 362–367, 2008. Disponível em: http://ieeexplore.ieee.org/document/6073006/. Acesso em: 6 jun. 2025.

ZHOU, X. *et al.* Indoor visual positioning using stationary semantic distribution registration and building information modeling. **Automation in Construction**, [*s. l.*], v. 172, p. 106033, 2025. Disponível em: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0926580525000731. Acesso em: 16 mar. 2025.