

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA MECATRÔNICA

LUCAS VINICIUS KELLER

REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA SOBRE TECNOLOGIAS DE
POSICIONAMENTO INDOOR.

Joinville
2024

LUCAS VINICIUS KELLER

REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA SOBRE TECNOLOGIAS DE
POSICIONAMENTO INDOOR.

Trabalho apresentado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecatrônica, no Curso de Engenharia Mecatrônica, do Centro Tecnológico de Joinville, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. James Schipmann Eger

Joinville
2024

RESUMO

As tecnologias de posicionamento *indoor* (IPS) são amplamente utilizadas para fornecer localização precisa em ambientes fechados, sendo essenciais em aplicações que vão desde a logística até sistemas de navegação em locais complexos. No entanto, a evolução dessas tecnologias enfrenta desafios, como a necessidade de lidar com incertezas de medição e a integração em cenários dinâmicos, onde objetos e barreiras podem interferir no desempenho. Nesse contexto, este trabalho apresenta uma análise detalhada da evolução das tecnologias IPS por meio de uma revisão sistemática da literatura. Propõe-se caracterizar o estado da arte, identificar as tendências de pesquisa, mapear a distribuição geográfica dos estudos, identificar as abordagens de incerteza de medição e destacar lacunas na área. O estudo revelou avanços significativos em tecnologias de posicionamento indoor, com destaque para maior precisão em métodos híbridos e baseados em aprendizado de máquina, mas identificou lacunas, como validação em cenários dinâmicos e soluções de baixo custo, indicando desafios ainda a serem superados.

Palavras-chave: Posicionamento Indoor. Revisão Bibliográfica Sistemática. Incerteza de Medição.

ABSTRACT

Indoor Positioning Systems (IPS) technologies are widely used to provide precise location in indoor environments, playing a crucial role in applications ranging from logistics to navigation systems in complex venues. However, the evolution of these technologies faces challenges, such as addressing measurement uncertainties and integration in dynamic scenarios where objects and barriers may interfere with performance. In this context, this study proposes a detailed analysis of the evolution of IPS technologies through a systematic literature review. The aim is to characterize the state of the art, identify research trends, map the geographical distribution of studies, examine approaches to measurement uncertainty, and point out gaps in the field. The study highlighted significant advancements in indoor positioning technologies, emphasizing higher accuracy in hybrid and machine learning-based methods, but identified gaps such as validation in dynamic scenarios and the development of low-cost solutions, indicating challenges yet to be addressed.

Keywords: Indoor Positioning. Systematic Literature Review. Measurement Uncertainty.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Arquitetura IPS	9
Figura 2 – Relacionamento das Palavras-Chave	13
Figura 3 – Frequência das Publicações por País	19
Figura 4 – Quantidade de Citações por País	20
Figura 5 – Fator de Impacto Médio e Número de Pesquisas por Ano	21
Figura 6 – Agrupamentos dos Principais Temas	24

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação de Técnicas e Tecnologias	17
Tabela 2 – Publicações Mais Citadas	21
Tabela 3 – Artigos Seleccionados	25
Tabela 4 – Precisões por Tecnologia	33

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
1.1	Contexto	8
1.2	Justificativa	8
1.3	Objetivos	10
1.4	Estrutura do Documento	10
2	MÉTODOS	11
2.1	Planejamento	12
2.1.1	Bases de Dados	12
2.1.2	Ferramentas de Organização	12
2.2	Escopo	12
2.3	Pesquisa	13
2.4	CrITÉrios de Inclusão e Exclusão	14
2.5	Métodos de Análise e de Síntese	15
3	RESULTADOS	16
3.1	Análise Bibliométrica	16
3.1.1	Agrupamentos de técnicas e tecnologias	16
3.1.2	Quantificação Geográfica	19
3.1.3	Distribuição Temporal e Impacto	20
3.1.4	Acesso e Recursos	20
3.1.5	Análise por Coautoria	21
3.1.6	Análise por Coocorrência	22
3.1.7	Análise por Citação	22
3.1.8	Análise por Acoplamento Bibliográfico	23
3.1.9	Análise por Cocitação	23
3.1.10	Análise por mapa baseado em texto	24
3.2	Seleção dos Artigos de Estudo	24
3.2.1	Tecnologia 5G (GAO et al., 2022b)	26
3.2.2	Plataforma de Integração Wi-Fi/IMU (GUO et al., 2022)	27
3.2.3	Posicionamento usando comunicação de luz visível (ZHU et al., 2023)	28
3.2.4	Posicionamento por Luz Visível para IoT (ZHU et al., 2024)	29
3.2.5	Caracterização do Estado da Arte	30
3.2.6	Tendências de Pesquisa e Sua Distribuição Geográfica	31
3.2.7	Abordagem de Incerteza de Medição	32

3.2.8	Limitações	34
4	CONCLUSÕES	35
	REFERÊNCIAS	36
	APÊNDICE A	44

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO

O posicionamento em ambientes fechados (ou *indoor*) tornou-se uma área de crescente interesse, principalmente devido à limitação dos sistemas globais de posicionamento por satélite (GNSS) em ambientes internos, onde sinais de satélite são bloqueados ou sofrem distorções (MAUTZ, 2012). Segundo Syazwani et al. (2022), os sistemas de posicionamento *indoor* são tecnologias desenvolvidas para localizar objetos ou indivíduos em ambientes internos, onde os sinais de GPS apresentam limitações e não são confiáveis.

Desde os primeiros desenvolvimentos, o objetivo de alcançar um sistema de posicionamento *indoor* (IPS) tão eficiente quanto o GNSS para ambientes externos impulsionou diversas abordagens tecnológicas. Essa crescente importância do tema é impulsionada pela demanda por sistemas com boa exatidão de navegação para dispositivos móveis, Internet das Coisas (IoT) e até veículos autônomos, tornando o estudo da evolução dessas tecnologias essencial (EL-SHEIMY; LI, 2021).

Diversas tecnologias têm sido utilizadas para implementação de IPS, incluindo ondas de rádio, infravermelho, luz visível, som e campos magnéticos, juntamente com algoritmos avançados e técnicas de aprendizado de máquina (GEOK et al., 2021; BRENA et al., 2017). Sistemas que fazem uso de tais tecnologias oferecem soluções para rastreamento de localização em tempo real, navegação interna e gerenciamento de inventário (SYAZWANI et al., 2022).

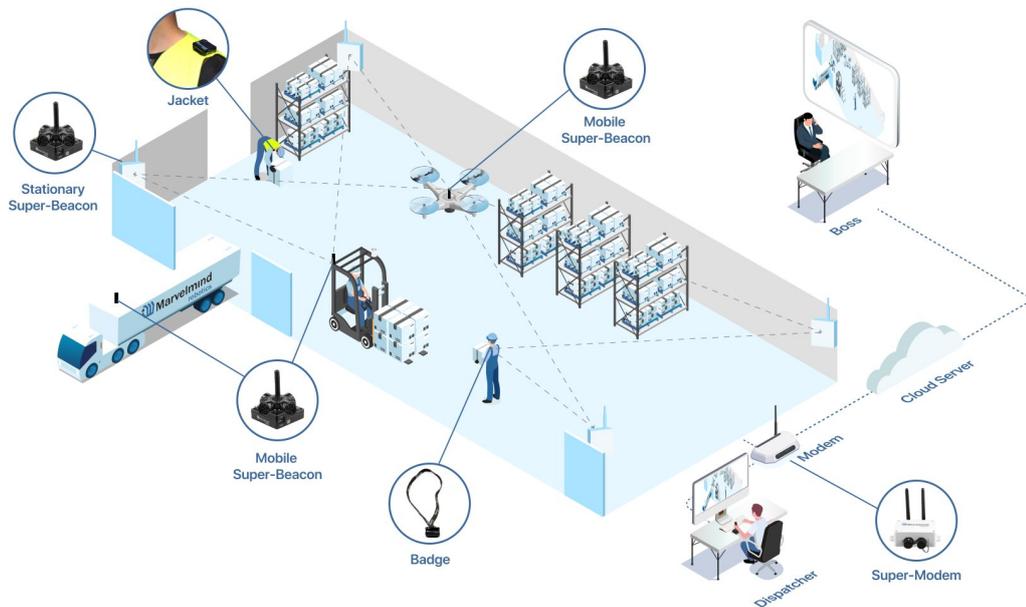
A Figura 1 ilustra um exemplo de solução comercial de arquitetura do IPS em um armazém (MARVELMIND, 2019), mostrando os tipos de dispositivos emissores de sinal fixos e móveis e o serviço de transmissão em tempo real dos dados coletados.

A evolução de IPS tem visto o desenvolvimento de diversas abordagens e tecnologias, abordando desafios como ambientes multicaminhos, eficiência energética e erros de posicionamento acumulados. Além disso, avanços recentes em IPS melhoraram a exatidão e a adaptabilidade a ambientes desconhecidos (GEOK et al., 2021). Como uma demanda emergente com amplas aplicações, soluções em IPS continuam a atrair interesse científico e empresarial, impulsionando pesquisa e desenvolvimento contínuos na área (CAROTENUTO; IERO; MERENDA, 2022).

1.2 JUSTIFICATIVA

O interesse no posicionamento *indoor* cresceu exponencialmente com a popularização dos dispositivos móveis e da infraestrutura de redes, além da expansão

Figura 1 – Arquitetura IPS



Fonte: Marvel Robotics

de aplicações voltadas à gestão de edificações, monitoramento de saúde, segurança, entre outros setores (ZAFARI; GKELIAS; LEUNG, 2019).

A maioria das técnicas atuais depende de sinais sem fio, como Wi-Fi, RFID, Bluetooth e ultra banda larga (UWB), bem como de sensores embutidos nos dispositivos móveis, como acelerômetros e giroscópios. Contudo, um desafio persistente é a precisão e a robustez das leituras fornecidas por esses sensores, uma vez que, em ambientes internos, há interferências e alterações contínuas que afetam a estabilidade e a confiabilidade dos dados (JANG; KIM; KIM, 2023).

Nos últimos anos, novas abordagens, como a utilização de marcos internos ou *landmarks*, têm ganhado atenção como uma alternativa de posicionamento robusta em ambientes sujeitos a frequentes mudanças (JANG; KIM; KIM, 2023).

O conceito de *landmarks*, que identifica pontos específicos e estáveis em um espaço, ajuda a superar a limitação de métodos que exigem frequentes atualizações do mapa de sinal em função de alterações na estrutura interna. Esse método, somado ao desenvolvimento de técnicas de aprendizado de máquina e à integração de sensores de múltiplas fontes, representa um avanço importante para a precisão e a confiabilidade do posicionamento *indoor*, com potencial aplicação em setores como navegação em shopping centers, hospitais e edifícios corporativos (EL-SHEIMY; LI, 2021).

Por fim, a caracterização das tecnologias de IPS possibilitam uma análise crítica dos parâmetros de desempenho, considerando fatores como custo, disponibilidade, consumo de energia, latência e escalabilidade. A avaliação desses aspectos permite

identificar o estágio atual da tecnologia e as demandas para futuras pesquisas e implementações comerciais (ZAFARI; GKELIAS; LEUNG, 2019).

Desta forma, este trabalho visa contribuir para o entendimento da trajetória evolutiva das tecnologias de posicionamento *indoor*, bem como interpretar quais são os próximos passos do avanço no setor.

Os objetivos geral e específicos são apresentados na seção 1.3.

1.3 OBJETIVOS

O **objetivo geral** deste trabalho é apresentar a evolução das tecnologias de posicionamento *indoor* a partir de uma revisão sistemática de literatura.

Os **objetivos específicos** são:

- Caracterizar o estado-da-arte do tema de pesquisa;
- Identificar as tendências de pesquisa sobre as tecnologias de posicionamento *indoor* ao longo do tempo e também sua distribuição geográfica;
- Identificar como é feita a abordagem de incerteza de medição neste contexto;
- Identificar os artigos científicos de maior relevância;
- Encontrar lacunas de pesquisa.

1.4 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

As seções subsequentes deste documento se estruturam em capítulos. No Capítulo 2, apresenta-se a metodologia adotada para a revisão da literatura – a PRISMA. O Capítulo 3 aborda a revisão sistemática e a análise bibliométrica. A discussão final do tema ocorre no Capítulo 4, evidenciando-se as referências para o trabalho.

2 MÉTODOS

A metodologia PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) é amplamente utilizada para garantir transparência, rigor e consistência em revisões sistemáticas e meta-análises, orientando os pesquisadores desde a formulação da pergunta até a análise dos resultados, com foco na redução de vieses e na confiabilidade dos dados. Page et al. (2021) atualizaram a PRISMA, originalmente publicada em 2009, incorporando avanços metodológicos e práticas emergentes. As novas diretrizes refletem o crescente uso de revisões sistemáticas em diversas áreas, o desenvolvimento de novas ferramentas de análise e incluem recomendações detalhadas para maior precisão e transparência em todas as etapas do processo, da coleta de dados à interpretação dos resultados.

Reche et al. (2020) apresentam um método de revisão que enfatiza a análise crítica e a organização estruturada das publicações científicas, destacando a identificação de lacunas, tendências e contribuições relevantes em áreas específicas. Essa abordagem valoriza o uso de critérios bem definidos para a seleção e avaliação das fontes, garantindo maior relevância e qualidade nos estudos analisados.

O método de revisão sistemática utilizado neste trabalho consiste de uma adaptação feita a partir das recomendações de duas publicações importantes na área: a estrutura e conteúdo do texto baseiam-se na metodologia PRISMA, conforme descrito por Page et al. (2021); já as técnicas de revisão e análise da literatura baseiam-se em Reche et al. (2020). O Apêndice A - Verificação de Itens PRISMA no TCC, apresenta a aderência metodológica do TCC às melhores práticas recomendadas para revisões sistemáticas, garantindo maior transparência e rigor científico no processo

O método resultante é dividido em **cinco etapas**:

1. Planejamento;
2. Escopo;
3. Pesquisa;
4. Avaliação;
5. Síntese e Análise.

A execução de cada etapa desta pesquisa é detalhada nos tópicos subsequentes.

2.1 PLANEJAMENTO

2.1.1 Bases de Dados

Nesta etapa definiram-se as bases de dados de uso para a pesquisa por referências, de forma a selecionar publicações de qualidade na área de IPS. Os indexadores inicialmente considerados, levando-se em conta a área da pesquisa, foram Web of Science, Scopus e Dimensions.

De acordo com Singh et al. (2021), a base de dados Web of Science é reconhecida por maior seletividade, enquanto o Dimensions destaca-se por ser a mais abrangente em termos de cobertura de periódicos. Por sua vez, a Scopus apresenta-se entre as duas, oferecendo equilíbrio entre seletividade e amplitude, sendo assim selecionada para este estudo.

2.1.2 Ferramentas de Organização

Para o desenvolvimento do trabalho bibliográfico, foram selecionadas ferramentas específicas para a organização do material pesquisado. Com base na análise comparativa de ferramentas de gerenciamento realizada por Ivey e Crum (2018), optou-se pelo uso do software de gerenciamento de referências Mendeley para a catalogação, leitura e controle do material pesquisado. Essa escolha fundamenta-se na interface amigável, facilidade de integração de referências e por ser uma ferramenta gratuita.

Para filtrar dados bibliométricos e dar início às análises, utilizou-se o editor de planilhas gratuito do Google, que oferece funcionalidades suficientes para manipulação e organização dos dados.

O VOSviewer foi utilizado para a geração de mapas bibliométricos devido à sua interface intuitiva, especialmente projetada para análises bibliométricas. A ferramenta também se destaca por sua capacidade de lidar com grandes volumes de dados, proporcionando maior precisão e clareza na identificação de padrões.

2.2 ESCOPO

Com o intuito de formular perguntas que fundamentassem a busca e a análise dos resultados, bem como consolidar os objetivos que orientariam a pesquisa por publicações, foi realizada uma análise exploratória sobre revisão bibliográfica sistemática, IPS e as palavras-chave *indoor positioning* e *uncertainty in measurement*.

Considerando os objetivos apresentados no primeiro capítulo, propuseram-se os seguintes questionamentos:

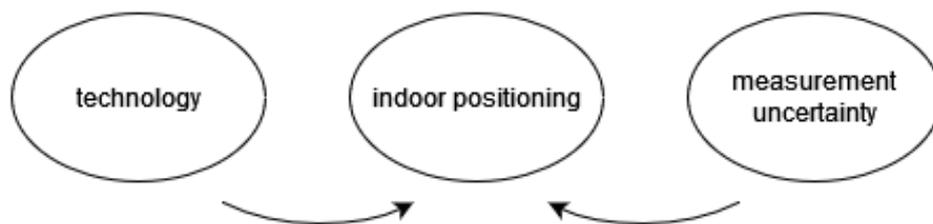
- Quais são os trabalhos mais relevantes relacionados ao tema?
- Quais são os autores mais destacados na pesquisa sobre o tema?

Essa abordagem permitiu direcionar a investigação para compreender a evolução das tecnologias de IPS a partir de uma revisão sistemática da literatura.

2.3 PESQUISA

A definição dos pilares *indoor positioning* e *technology* foi realizada com base em uma abordagem qualitativa, que envolveu a experimentação de diferentes strings de busca relacionadas ao tema. Os resultados, analisados com o auxílio do VOSviewer, identificaram palavras-chave mais representativas e alinhadas aos objetivos da pesquisa, levando à exclusão de termos como *localization* e *environment*. O termo *measurement uncertainty* foi selecionado por sua relevância em análises metrológicas. A Figura 2 ilustra a integração desses pilares, destacando como atuam conjuntamente na busca por trabalhos que exploram a borda do conhecimento. Embora *indoor positioning* seja o tema principal, os termos *technology* e *measurement uncertainty* alicerçam a busca pelas novidades.

Figura 2 – Relacionamento das Palavras-Chave



Fonte: Autor

A consulta à base de dados foi realizada mediante a construção de uma string de busca específica. Este processo passou por refinamentos para atingir os objetivos almejados, consistindo na inserção da string e na observação da quantidade de artigos retornados, bem como na análise de seus anos de publicação, número de citações e referências. Esse refinamento permitiu ajustar a busca para alcançar uma seleção inicial mais relevante de publicações.

Segue a string final com as suas explicações detalhadas:

```
TITLE-ABS-KEY("indoor position*") AND TITLE-ABS-KEY(technology OR method)
AND TITLE-ABS-KEY ("measurement uncertainty" OR "positioning accuracy")
AND DOCTYPE(ar) AND SRCTYPE(j) AND (PUBYEAR > 2013 AND PUBYEAR < 2025)
AND (LIMIT-TO (LANGUAGE,"English")) AND (LIMIT-TO (PUBSTAGE,"final"))
```

- TITLE-ABS-KEY("indoor position*"): Localiza documentos onde o termo *indoor position** (considerando variações como *position*, *positioning*) aparece no título, resumo ou nas palavras-chave. O uso do asterisco permite a busca por diferentes variações do termo;

- TITLE-ABS-KEY(technology OR method): Filtra por documentos que contenham o termo *technology* ou *method* no título, resumo ou nas palavras-chave, indicando que o foco está em tecnologias ou métodos aplicados ao posicionamento *indoor*;
- TITLE-ABS-KEY("measurement uncertainty" OR "positioning accuracy"): Limita a busca para documentos que discutem especificamente *measurement uncertainty* ou *positioning accuracy*, também no título, resumo ou palavras-chave;
- DOCTYPE(ar): Filtra os resultados para incluir apenas artigos (ar), excluindo outros tipos de documentos, como capítulos de livros ou anais de conferências;
- SRCTYPE(j): Restringe a busca a periódicos (j), garantindo que os documentos sejam artigos publicados em revistas científicas, em vez de outros tipos de publicações;
- (PUBYEAR > 2013 AND PUBYEAR < 2025): Limita a busca a artigos publicados entre 2014 e 2024, considerando um recorte temporal abrangente para o tema;
- (LIMIT-TO (LANGUAGE, "English")): Restringe os resultados a documentos publicados em inglês;
- (LIMIT-TO (PUBSTAGE, "final")): Filtra para incluir apenas artigos na versão final de publicação, excluindo documentos em estágio de pré-publicação ou rascunhos;
- AND: Exige que todos os critérios conectados por esse operador estejam presentes no resultado. Ele restringe a busca, pois somente os artigos que atendem a todos os requisitos especificados serão retornados;
- OR: Indica que qualquer um dos critérios conectados por esse operador pode estar presente no resultado. Ele amplia a busca, pois retorna artigos que atendem a pelo menos um dos critérios.

Os artigos retornados apresentam maior confiabilidade e qualidade, pois são revisados por pares e estão alinhados ao problema de pesquisa e aos objetivos propostos. A limitação ao idioma inglês justifica-se por sua ampla visibilidade, sendo o mais utilizado em disseminações científicas de grande alcance.

2.4 CRITÉRIOS DE INCLUSÃO E EXCLUSÃO

Nesta etapa foram aplicados critérios usuais de inclusão e exclusão, buscando resultados impactantes e influentes.

Os primeiros critérios foram a consideração de revistas com fator de impacto Scimago Journal Rank (SJR) superior a 1,5, sendo Q1 ou Q2. O SJR é um indicador que mede a influência científica de periódicos acadêmicos, considerando tanto o número de citações recebidas quanto a importância ou prestígio das revistas de onde essas citações se originam. O quartil divide os periódicos em quatro grupos com base na posição relativa do periódico no ranking de impacto para sua área.

Segundo Mautz (2012), o rápido progresso nesse campo exige uma atualização

periódica, com revisões a cada 3 a 5 anos, para representar adequadamente o estado da arte. Considerando essa recomendação optou-se por delimitar o período analisado, considerando somente documentos a partir de 2021.

Por fim, foram desconsiderados resultados com zero citações. Nota-se que apesar do curto intervalo desde a publicação dos artigos de 2024, o que reduz o tempo disponível para que sejam citados, optou-se por priorizar exclusivamente trabalhos já referenciados. Essa decisão visou garantir que as contribuições analisadas apresentassem um grau de reconhecimento acadêmico, reforçando a confiabilidade e a relevância dos resultados discutidos.

2.5 MÉTODOS DE ANÁLISE E DE SÍNTESE

Os dados coletados foram organizados em uma planilha eletrônica para classificação dos artigos com base em impacto, ano de publicação e tecnologias abordadas. Com os metadados, gráficos foram gerados para identificar padrões, como tendências temporais, distribuição geográfica e áreas predominantes, oferecendo uma visão ampla da produção científica.

A ferramenta VOSviewer foi empregada para a elaboração de mapas bibliométricos, com o objetivo de analisar as relações estruturais entre pesquisadores, artigos e referências. Essa abordagem permitiu compreender as redes de colaboração, a influência de trabalhos científicos e a estrutura da literatura relacionada ao tema em estudo.

Por fim, a leitura de títulos, resumos e palavras-chave possibilitou a categorização temática e a seleção de artigos mais relevantes. Estes por sua vez, após completa leitura, destacaram lacunas e contribuições que fundamentaram as discussões e propostas do estudo.

3 RESULTADOS

Inicialmente, previa-se a utilização do gerenciador de referências Mendeley, propriedade da Elsevier, para a pesquisa de artigos por meio de seu buscador nativo, bem como para a leitura, os apontamentos e a organização referencial. No entanto, testes preliminares com strings de busca revelaram divergências significativas no número de resultados entre os buscadores. Por exemplo, a expressão *indoor positioning system* retornou 22.758 resultados na Scopus, enquanto no Mendeley obteve apenas 20.078 ocorrências. Assim, optou-se por conduzir a pesquisa diretamente pelo *website* da Scopus.

A string final utilizada, detalhada no capítulo anterior, retornou 899 resultados. Os metadados desses artigos foram exportados para um editor de planilhas, onde foi realizado o processo de organização e filtragem. Como o arquivo exportado não incluía os indicadores das revistas, estas foram listadas e pesquisadas individualmente no *website* da base de dados.

Na planilha consolidada, aplicaram-se os filtros correspondentes aos critérios de inclusão e exclusão, resultando em uma seleção de 100 artigos.

Em seguida, foi realizada uma verificação que considerou a leitura dos títulos, resumos e palavras-chave dos artigos selecionados, confirmando aqueles que correspondiam ao escopo da pesquisa e à avaliação proposta. Essa verificação não resultou em uma redução no número de estudos inicialmente obtidos (100 artigos), inferindo-se tratar de uma base consistente sobre um tema emergente no campo das pesquisas.

3.1 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

Esta seção apresenta a análise bibliométrica dos 100 artigos selecionados, com foco em indicadores quantitativos que permitem compreender o panorama das publicações sobre tecnologias de posicionamento *indoor*. São examinados aspectos como volume de publicações ao longo do tempo, principais periódicos, autores mais produtivos e tecnologia abordadas.

3.1.1 Agrupamentos de técnicas e tecnologias

Com base na análise das ocorrências de palavras-chave, propõem-se os agrupamentos de técnicas e tecnologias conforme apresentado na Tabela 1.

A análise de coocorrência de palavras-chave determina as relações com base na frequência com que dois termos aparecem simultaneamente em publicações. Quanto

maior a coocorrência, mais forte é a conexão entre os termos. Essas relações são representadas em mapas, revelando agrupamentos temáticos.

Tabela 1 – Classificação de Técnicas e Tecnologias

Agrupamento	Termos e Autores
Técnicas de Posicionamento	Trilateration, Fingerprinting, Pedestrian Dead Reckoning (PDR), Simultaneous Localization and Mapping (SLAM), Angle of Arrival (AoA), Time Difference of Arrival (TDOA), Magnetic Positioning, Radio Signal Strength Indicator (RSSI)
	(CHOI; CHOI, 2021), (SUN et al., 2022b), (RUAN et al., 2023), (TORRES-SOSPEDRA et al., 2022), (LI et al., 2021), (YUE; ZHAO; LI, 2021), (SADHUKHAN et al., 2021), (WANG et al., 2023), (HUANG et al., 2023), (KUANG et al., 2023), (GABBRIELLI et al., 2023), (WU et al., 2022), (GUO et al., 2023), (DING et al., 2022), (JIA et al., 2022), (WANG et al., 2022), (HE; HSU; TSENG, 2022), (SARTAYEVA; CHAN, 2023), (HU et al., 2024), (SHAO et al., 2021), (YANG et al., 2023), (WU et al., 2023), (WU et al., 2021), (YUAN et al., 2024), (LI; ELNAHAS; QUAN, 2024), (YONGLIANG et al., 2022), (GONG et al., 2024), (ZHAO et al., 2024)
Tecnologias de Comunicação e Sensores	Wi-Fi, UWB (Ultra-wideband), Bluetooth Low Energy (BLE), Visible Light Positioning (VLP), Acoustic Signal, GNSS, RFID, Wireless Sensor Networks (WSN), Smartphone Sensors, Inertial Measurement Unit (IMU), Photodiodes, Microcontrollers, Light-Emitting Diode (LED) Arrays, Access Points (AP)

Agrupamento	Termos e Autores
	(BERNARDINI et al., 2021), (JIANG et al., 2021), (CHEN et al., 2021), (ZHANG et al., 2021), (MA et al., 2022), (LI et al., 2021), (GUO et al., 2022), (WANG et al., 2022), (MA; ZHANG; QIN, 2022), (YAMASHITA et al., 2021), (LIU et al., 2024), (LYU et al., 2023), (YANG; ZHAO; LI, 2021), (KONG et al., 2023a), (FONTAINE et al., 2023), (LIU et al., 2022), (PENDAO; MOREIRA, 2021), (??), (DOU et al., 2023), (CAO; CHEN, 2022), (CASANOVA-MARQUÉS et al., 2023), (CHIU; CHAN; FENG, 2022), (WANG et al., 2023), (XU et al., 2024a), (YANG et al., 2024), (GUO et al., 2022)
Métodos de Aprendizado de Máquina	<p data-bbox="555 824 1380 1003">Deep Learning, Convolutional Neural Networks (CNN), Artificial Neural Network (ANN), Support Vector Machines (SVM), Reinforcement Learning, Federated Learning (FL), Siamese Network</p> <p data-bbox="555 1037 1380 1355">(BAKAR et al., 2021), (LI et al., 2021), (TRAN; HA, 2022), (ARANDA et al., 2022), (ALITALESHI; JAZAYERIY; KAZEMITABAR, 2023), (ZHOU et al., 2022), (CAPPELLI et al., 2023), (CHEN et al., 2022), (KIRMAZ et al., 2023), (CHEN; ZHANG, 2024), (WANG et al., 2024), (CAO et al., 2024), (SARTAYEVA et al., 2023), (LIN et al., 2023), (WAN et al., 2024), (GAO et al., 2022b)</p>
Algoritmos e Filtros	<p data-bbox="555 1397 1380 1576">Extended Kalman Filter (EKF), Unscented Kalman Filter (KF), Adaptive Optimization Firefly Algorithm (AOFA), Particle Swarm Optimization (PSO), Bayesian Cramer-Rao Lower Bound</p> <p data-bbox="555 1610 1380 1879">(YU et al., 2021), (BI et al., 2023), (KONG et al., 2023b), (FENG et al., 2023), (MEHRABIAN; RAVANMEHR, 2023), (SHI; YU; YIN, 2022), (YANG et al., 2022), (KO; WU, 2022), (XU et al., 2024b), (BI et al., 2024), (JIA et al., 2023), (LIU et al., 2023b), (ZHOU et al., 2024), (GAO et al., 2022a), (CAO et al., 2023), (ZHU et al., 2024), (ZHU et al., 2023)</p>

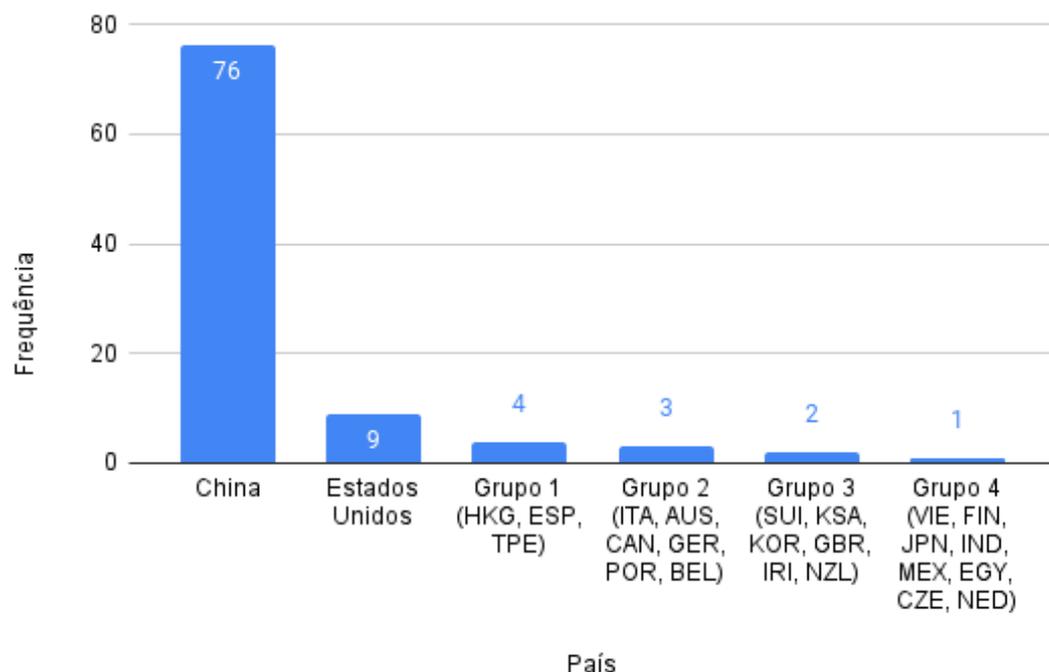
Agrupamento	Termos e Autores
Conceitos Gerais e Desafios	Signal Integrity, Abrupt Noise, Unmanned Aerial Vehicle (UAV), Sensor Networks, Internet of Things (IoT), Visual Indoor Positioning, High-Precision Positioning, Non-Line-of-Sight (NLOS)
	(CUI et al., 2021), (WANG et al., 2022), (GAO et al., 2023), (SUN et al., 2022a), (ZHAO et al., 2022), (DONG et al., 2023), (LI et al., 2023), (XIE et al., 2022), (LIU et al., 2023a), (WANG et al., 2024), (LI et al., 2024), (ZHANG et al., 2024), (ZHU et al., 2024)

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.2 Quantificação Geográfica

As Figuras 3 e 4 apresentam, respectivamente, a quantidade de artigos e o número de citações.

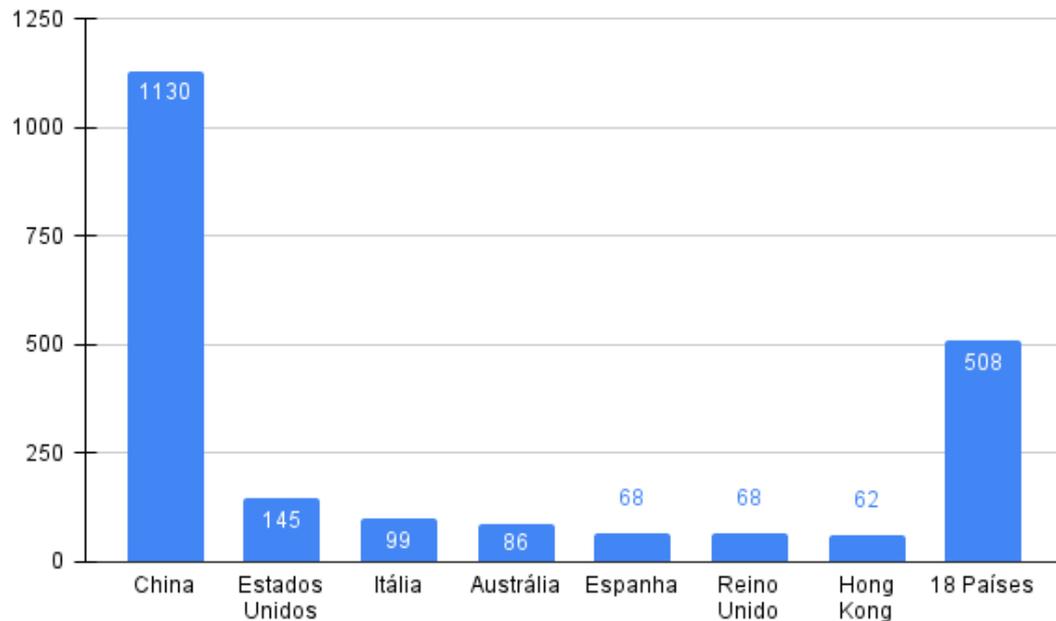
Figura 3 – Frequência das Publicações por País



Fonte: Autor.

Ao comparar os dados, destaca-se a China como a principal produtora de publicações, tanto em volume individual quanto em colaborações internacionais, reforçando sua influência no campo. Com um número expressivo de citações,

Figura 4 – Quantidade de Citações por País



Fonte: Autor.

reafirma sua liderança. Além disso, apenas China e Estados Unidos publicaram consistentemente nos últimos quatro anos.

3.1.3 Distribuição Temporal e Impacto

A Figura 5 categoriza por ano a quantia de pesquisas e o respectivo fator de impacto médio.

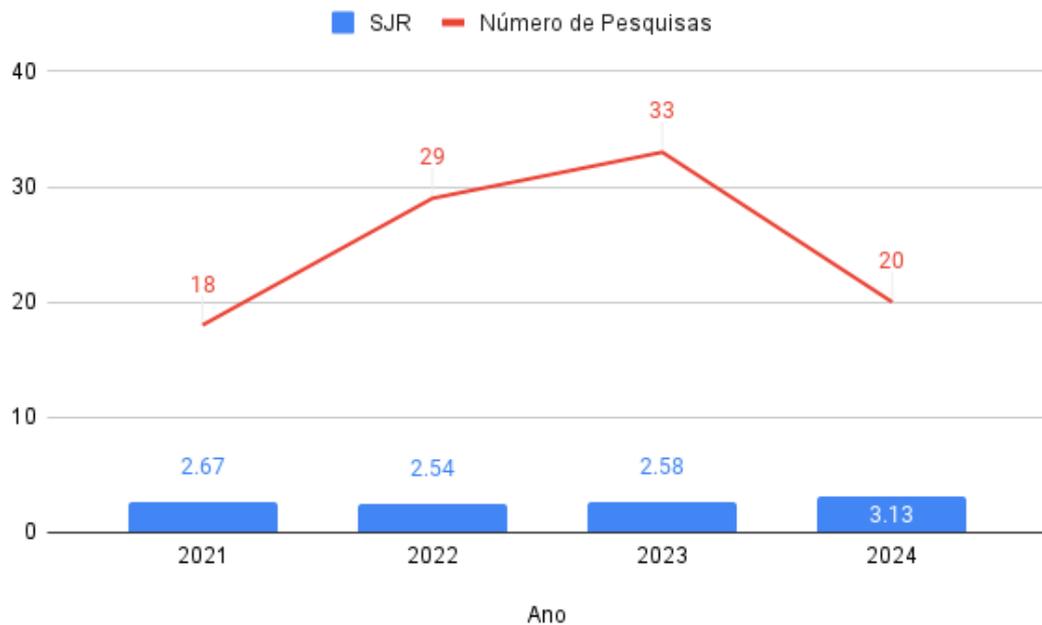
Embora o fator de impacto médio tenha mostrado crescimento consistente, observa-se uma redução na quantidade de publicações em 2024, o que pode indicar princípios de maturação do campo ou mudanças no foco da comunidade científica.

Outro dado relevante diz respeito ao número de citações distribuídas por faixa de fator de impacto, evidenciando a qualidade das contribuições científicas analisadas. Os dados coletados indicam que aproximadamente 52% dos estudos possuem fator de impacto superior a 2,5, sendo que 13% destes situam-se na faixa de impacto entre 5,0 e 9,9. Esses resultados sugerem que o tema em questão exerce significativa influência acadêmica

3.1.4 Acesso e Recursos

Através da Tabela 2 são observados os artigos mais citados, com ano de publicação e fator de impacto da revista.

Figura 5 – Fator de Impacto Médio e Número de Pesquisas por Ano



Fonte: Autor.

A análise revela concentração de publicações mais citadas em 2021, possivelmente refletindo um marco inicial de aplicação prática das tecnologias analisadas.

Adicionalmente, ao comparar os dados entre colaborações internacionais e publicações locais, observa-se que as primeiras representam apenas 27% do volume total, contudo apresentam maior relevância, com um impacto 15% superior ao das produções locais. Conclui-se, portanto, que as colaborações internacionais, apesar de menos frequentes, impactam de maneira mais expressiva para o avanço científico na área.

Tabela 2 – Publicações Mais Citadas

País	Ano	SJR	Citações
Itália	2021	1.54	79
China	2021	3.38	71
China	2021	1.89	62

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.5 Análise por Coautoria

As análises de coautoria determinam as relações com base no número de publicações compartilhadas entre autores. Quanto maior o número de trabalhos em

coautoria, mais forte é a conexão estabelecida. Elas revelam redes de colaboração no campo de estudo, destacando os principais autores e instituições.

Tal análise evidenciou grupos de autores e a temática explorada pelos trabalhos mais recentes. Foi estudado *Visible Light Positioning (VLP)*, tanto na abordagem da integração de tecnologias de aprendizado de máquina para lidar com desafios como ruído, interferência ou variações no ambiente de iluminação, quanto na melhoria da confiabilidade e a precisão desses sistemas através do método *RatioVLP*, que mede e reduz os efeitos da luz ambiente.

A análise por organização trouxe as universidades em foco, com destaque para a Universidade de Wuhan.

3.1.6 Análise por Coocorrência

A coocorrência identifica as relações pela frequência com que dois termos aparecem juntos em um mesmo documento ou contexto. Quanto maior a coocorrência, mais forte é a conexão entre os termos, evidenciando tendências temáticas e relacionamentos entre conceitos, auxiliando na compreensão da estrutura conceitual de uma área de pesquisa.

A verificação de coocorrência por palavras-chave apresentou quatro agrupamentos, sendo três isolados e um com formações de subcampos de tópicos mais explorados.

1. Os isolados abordaram:
 - a) TDOA;
 - b) AoA;
 - c) CNN, NLOS, PSO e Wi-Fi.
2. O agrupamento central foi subdividido em cinco:
 - a) IoT e *Wi-Fi Fingerprinting*;
 - b) *Deep Learning* e IMU;
 - c) VLP, *Channel State Information (CSS)* e *Fingerprinting*;
 - d) PDR e *Sensor Fusion*;
 - e) BLE, *Acoustic Signal* e *Data Fusion*.

3.1.7 Análise por Citação

A análise por citação determina as relações com base no número de vezes que um documento, autor ou fonte é citado por outro. Quanto maior o número de citações entre os itens, mais forte é a conexão, indicando os trabalhos mais influentes e identificando padrões de citação que refletem a disseminação e o reconhecimento de pesquisas específicas.

No agrupamento de citações por autores, três lideranças de campo foram identificadas, a lista que segue apresenta os nomes e suas forças de citação:

1. Chen R. - 20;
2. Guo G. - 13;
3. Zhuang Y. - 10.

3.1.8 Análise por Acoplamento Bibliográfico

As investigações por acoplamento bibliográfico determinam as relações com base no número de referências compartilhadas entre dois documentos. Quanto maior a quantidade de referências em comum, mais forte é a conexão, indicando subcampos ou áreas emergentes de pesquisa.

A análise de acoplamento bibliográfico por documentos revelou *clusters* formados por pesquisas utilizadas como base e estudos derivados.

- **Base:** Combinação de UWB com múltiplos sensores
 - **Resultado:** Aprofundamento no estudo de GNSS, UWB e VIO.
- **Base:** Sistema com múltiplos fotodiodos receptores e algoritmos de aprendizado de máquina
 - **Resultado:** Sistema baseado em matriz de LEDs com aprendizado profundo.
- **Base:** Tecnologia de medição acústica integrada a *smartphones*
 - **Resultado:** Criação de um sistema de rastreamento *indoor* baseado em sinais de áudio do tipo "chirp", eliminando a necessidade de sensores inerciais.

O acoplamento por fonte revelou as cinco principais revistas:

- IEEE *Communications Letters*;
- IEEE *Transactions on Vehicular Technology*;
- IEEE *Transactions on Instrumentation and Measurement*;
- IEEE *Internet of Things Journal*;
- IEEE *Transactions on Mobile Computing*.

3.1.9 Análise por Cocitação

A investigação por cocitação determina as relações pelo número de vezes que dois documentos, autores ou fontes são citados juntos em outros trabalhos, indicando como diferentes trabalhos ou autores são percebidos coletivamente na comunidade científica.

A busca de cocitação por referência apresentou pilares de sustentação no campo de estudo, como o *survey* de Zafari, Gkelias e Leung (2019) que apresenta uma revisão detalhada de técnicas e tecnologias de localização indoor, destacando

sistemas recentes e avaliando-os quanto à eficiência energética, custo, escalabilidade e precisão, além de discutir os desafios remanescentes.

A pesquisa de cocitação por autor revelou três grupos teóricos:

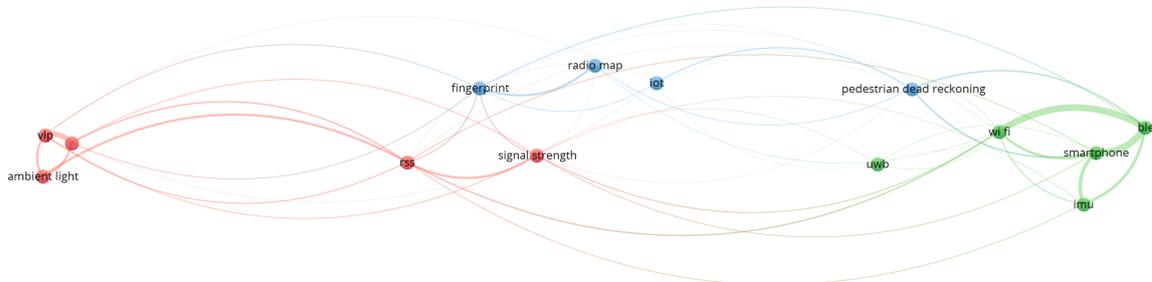
1. Métodos Baseados em Wi-Fi e Técnicas de Otimização;
2. Mitigação de NLOS e Métodos Híbridos com UWB, Bluetooth e PDR;
3. Sistemas Baseados em Luz Visível (VLP) e Aprendizado Profundo.

3.1.10 Análise por mapa baseado em texto

Os mapas baseados em texto são determinados por relações a partir da frequência e coocorrência de termos extraídos de títulos, resumos ou textos completos. Eles oferecem uma visualização da estrutura conceitual do tema estudado. A avaliação de temas principais e secundários bem representados é ideal para a revisão sistemática e é mostrada na Figura 6, na qual observam-se três agrupamentos.

O primeiro trata de luz ambiente, RSS, força de sinal e VLP. O segundo aborda BLE, IMU, *smartphone*, UWB e Wi-Fi. O terceiro investiga IoT, *Fingerprint*, PDR e *radio map*.

Figura 6 – Agrupamentos dos Principais Temas



Fonte: Autor.

A análise do mapa por título aponta tópicos mais evidentes, como: BLE e métodos híbridos; PDR e integração; Machine Learning e *Wireless Sensor Network*; Internet e Smartphone; Wi-Fi Fingerprinting.

A verificação do mapa por resumo aprofunda o entendimento da estrutura conceitual, observando-se que trabalhos mais recentes tem investigado IMU e VLP.

3.2 SELEÇÃO DOS ARTIGOS DE ESTUDO

Para selecionar as publicações mais relevantes ao tema, considerando os resultados da análise bibliométrica, foram aplicados critérios de classificação baseados

em uma metodologia de pontuação que abrangeu ano de publicação, número de citações, índice de impacto do periódico e a presença de termos estratégicos em títulos, resumos ou palavras-chave. A pontuação final foi obtida pela soma dos valores atribuídos a cada critério, sendo os artigos com maiores pontuações selecionados para compor a Tabela 3, por apresentarem maior alinhamento com os objetivos deste trabalho.

O critério de ano de publicação concedeu até 4 pontos, variando de 4 para 2024 a 1 para 2021. O número de citações recebeu até 4 pontos: 4 para 50 a 79 citações, 3 para 20 a 49, 2 para 10 a 19 e 1 para 1 a 9 citações. O impacto do periódico variou de 1 a 4 pontos, sendo 1 para índices entre 1,5 e 2,5, 2 pontos para 2,6 a 3,5, 3 pontos para 3,6 a 4,5 e 4 para índices de 4,6 a 9. Cada ocorrência de termos estratégicos no título, resumo ou palavras-chave somou 1 ponto à pontuação final. Os termos considerados foram: *received signal strength* (ou RSS), *inertial measurement unit* (ou IMU), *visible light positioning* (ou VLP), *fingerprint*, *smartphone*, *ultra-wideband* (ou UWB), *ambient light*, *bluetooth* (ou BLE), *Wi-Fi* (ou WiFi), *internet of things* (ou IoT), *signal strength* e *pedestrian dead reckoning* (ou PDR).

Tabela 3 – Artigos Selecionados

Autores	Título
(GAO et al., 2022b)	Toward 5G NR High-Precision Indoor Positioning via Channel Frequency Response: A New Paradigm and Dataset Generation Method
(GUO et al., 2022)	A Robust Integration Platform of Wi-Fi RTT, RSS Signal, and MEMS-IMU for Locating Commercial Smartphone Indoors
(ZHU et al., 2023)	Positioning Using Visible Light Communications: A Perspective Arcs Approach
(ZHU et al., 2024)	Centimeter-Level Indoor Visible Light Positioning

Fonte: Elaborado pelo autor.

A seguir são apresentados os principais pontos extraídos dos artigos selecionados na revisão sistemática, analisando como esses estudos se relacionam com os objetivos propostos neste trabalho. Nesse contexto, são destacados os avanços e limitações identificados na literatura. Essa abordagem permite compreender de que forma os achados da pesquisa podem subsidiar a evolução da área e responder às questões centrais do estudo.

3.2.1 Tecnologia 5G (GAO et al., 2022b)

A pesquisa aborda o desafio do posicionamento de alta precisão em sistemas 5G *New Radio* (NR), especialmente em ambientes internos e em cânions urbanos¹, onde os métodos tradicionais baseados em GPS apresentam limitações.

Estudos atuais sobre posicionamento no 5G enfrentam obstáculos significativos devido à falta de estações base comercializadas com integração de Sensoriamento e Comunicação (ISAC) e à ausência de conjuntos de dados públicos disponíveis. Os métodos existentes para a síntese de conjuntos de dados de posicionamento frequentemente produzem dados que não são suficientemente autênticos ou que possuem granularidade insuficiente para aplicações de alta precisão.

Para enfrentar esse problema, é proposta uma abordagem chamada Método de Síntese de Recursos em Níveis Múltiplos (*Multilevel-FSM*). Este método gera dados de Resposta em Frequência de Canal (CFR) que imitam de forma precisa os princípios reais de comunicação do 5G, aderindo às especificações do 3GPP R16.

As características principais são:

- uso de *ray-tracing* para modelar canais *multipath*;
- conversão de matrizes CFR de canais MIMO em imagens CFR únicas para maior densidade de informações;
- incorporação do aumento de dados para melhorar a robustez em relação ao ruído.

Também é introduzida uma nova rede de aprendizado profundo chamada *Multipath Res-Inception* (MPRI). Essa rede foi especificamente projetada para processar as imagens CFR geradas pelo *Multilevel-FSM*.

As características do MPRI são:

- uso do *Multipath Inception* para extração flexível de recursos;
- emprego de *Residual Sharing* para arquiteturas de rede mais profundas com rápida convergência;
- uso de filtros convolucionais dimensionados para capturar características do domínio de frequência e diferenças sutis de canal.

O estudo utiliza tecnologias bidimensionais (2D) como base principal, integrando elementos tridimensionais (3D) tanto no processamento quanto no objetivo final. Trata-se, portanto, de uma abordagem híbrida, em que técnicas 2D, como a utilização de imagens de resposta de frequência de canal e operações de convolução bidimensionais, são aplicadas para alcançar resultados de posicionamento em 3D.

O método foi testado em dois cenários: um escritório interno e um cânion urbano. O método MPRI alcançou precisões de posicionamento de 0,28 m em

¹ Cânion urbano é a denominação atribuída ao ambiente formado por edificações altas e próximas, que delimitam corredores estreitos nos centros urbanos, influenciando significativamente a propagação de ondas eletromagnéticas.

ambientes internos e 0,20 m em externos, superando vários métodos existentes de aprendizado profundo.

O trabalho representa um avanço significativo na pesquisa de posicionamento em 5G NR por disponibilizar um novo conjunto de dados público para a comunidade de pesquisa; o método MPRI demonstra maior precisão, eficiência e robustez ao ruído em comparação com métodos existentes; a abordagem é compatível com os padrões atuais do 5G, conectando a pesquisa teórica à implementação prática.

Embora os resultados sejam promissores, os autores destacam que pesquisas adicionais são necessárias para aprimorar o método em cenários dinâmicos. Além disso, os requisitos computacionais da rede MPRI podem precisar de otimização para implantação em dispositivos com recursos limitados.

3.2.2 Plataforma de Integração Wi-Fi/IMU (GUO et al., 2022)

Ambientes internos são complicados, visto que paredes e objetos bloqueiam os sinais, e o *layout* pode mudar. Isso dificulta o uso de métodos tradicionais, como o GPS ou a intensidade do sinal Wi-Fi, para obter resultados precisos.

Neste estudo criou-se um novo sistema que combina diferentes tecnologias para melhorar o posicionamento interno com uso em *smartphones*, através da intensidade do sinal (RSS) e do tempo de ida e volta (RTT) de sinais Wi-Fi, além dos sensores de movimento embutidos no telefone (MEMS-IMU) para rastrear movimentos.

O sistema coleta informações dos sinais Wi-Fi e dos sensores do *smartphone*, avalia a qualidade de cada dado usando um método de observação, estratégia de avaliação e controle de qualidade (OQECs), aplica um filtro de Kalman (ARKF) para combinar todas as informações e estimar a posição do celular. O sistema mantém a posição atualizada enquanto o usuário se move.

O trabalho apresentado utiliza predominantemente tecnologia de posicionamento bidimensional (2D), com foco principal na navegação no plano horizontal, comum em ambientes internos. Elementos tridimensionais (3D) são considerados na representação do estado do sistema e no processamento de dados de sensores, como o uso de vetores de posição em um referencial ENU e sensores de aceleração em três eixos. No entanto, a aplicação prática do sistema permanece centrada no posicionamento 2D, enquanto os componentes 3D aparecem como complementos teóricos ou para futuras extensões.

Assim, o sistema pode localizar um *smartphone* com erro inferior a 1 metro em espaços internos típicos, funcionando melhor em condições desafiadoras, como quando alguns sinais são bloqueados ou os sensores têm menor precisão. Observa-se que foi projetado para funcionar em *smartphones* convencionais.

Essa tecnologia pode facilitar a navegação em espaços internos, permitir novos serviços baseados em localização dentro de edifícios e apoiar aplicações da Internet

das Coisas (IoT).

3.2.3 Posicionamento usando comunicação de luz visível (ZHU et al., 2023)

Esta pesquisa concentra-se em aprimorar a tecnologia de posicionamento interno usando luz visível. O sistema utiliza luzes circulares especiais no teto. Essas luzes não apenas iluminam o ambiente, mas também transmitem informações. A câmera de um *smartphone* pode capturar imagens dessas luzes e receber as informações que elas estão transmitindo.

Desenvolveu-se dois algoritmos inteligentes. O algoritmo de círculo e arco de perspectiva assistida por VLC (V-PCA), é proposto para cenários onde uma luminária circular completa e uma incompleta podem ser capturadas pelo usuário. O algoritmo de arcos de perspectiva assistida por VLC antioclusão (OA-V-PA) é projetado para casos onde partes dos links VLC são bloqueados, usando duas luminárias circulares incompletas para posicionamento. Juntos, esses algoritmos são chamados de V-PA.

O trabalho utiliza quatro sistemas de coordenadas:

- sistema de coordenadas de pixel 2D (PCS);
- sistema de coordenadas de imagem 2D (ICS);
- sistema de coordenadas de câmera 3D (CCS);
- sistema de coordenadas do mundo 3D (WCS).

A abordagem alavanca relações geométricas entre luminárias e suas projeções no plano da imagem, usando um modelo de câmera padrão para luminárias de imagem. É incorporada comunicação de luz visível (VLC) para transmitir informações da luminária, incluindo coordenadas e IDs. Por fim, um esquema de processamento de imagem fundido é proposto para obter simultaneamente informações VLC e informações geométricas. Isso inclui técnicas para extração de contorno, ajuste de curva e demodulação de sinal VLC.

O trabalho apresentado utiliza tecnologias bidimensionais (2D) como base para captura e processamento de imagens, mas seu objetivo principal é o posicionamento tridimensional (3D). A integração entre 2D e 3D é realizada por meio de modelagem de projeção, transformações de coordenadas e algoritmos que utilizam características extraídas de imagens 2D para estimar a posição e a orientação em 3D. Assim, trata-se de uma abordagem híbrida, onde dados 2D servem como ponto de partida para análises e resultados finais em 3D.

Este sistema se destaca por não precisar de sensores adicionais no celular, já que utiliza apenas a câmera, além do aparelho poder ser segurado em qualquer ângulo, visto que o sistema ainda funcionará bem.

Os pesquisadores implementaram uma configuração experimental para verificar a viabilidade e eficiência do algoritmo proposto. Isso incluiu luminárias circulares,

gerador de sinal, drivers de LED, uma câmera de *smartphone* como receptor, um programa Android/Java para processamento de imagens e implementação de algoritmos. Durante os testes, o sistema tirou duas fotos rapidamente – uma com exposição longa e outra com exposição curta, assim obteve-se todas as informações necessárias. As principais métricas de avaliação de desempenho foram medida em termos de erro médio e função de distribuição cumulativa (CDF) do erro de localização, e quantificação usando erro relativo de matrizes de rotação estimadas. Conseguiu-se determinar a localização com um erro de posicionamento de cerca de 5 centímetros.

Essa tecnologia torna o VLP mais prático e preciso, aproximando a tecnologia de um "GPS interno" que funciona de forma eficaz.

3.2.4 Posicionamento por Luz Visível para IoT (ZHU et al., 2024)

Devido ao GPS não funcionar bem em ambientes fechados, explora-se o Posicionamento por Luz Visível (VLP) como alternativa. O VLP utiliza as luzes de LED de um ambiente para determinar sua localização. Cada LED emite um sinal único, e um *smartphone* ou outro dispositivo pode captar esses sinais e determinar a localização.

O VLP funciona usando as luzes LED em um edifício como beacons. Cada luz emite um sinal exclusivo, e um receptor (como um *smartphone* ou dispositivo IoT) mede a intensidade desses sinais para calcular sua posição. Este método é chamado de posicionamento baseado na Intensidade do Sinal Recebido (RSS). Para funcionar bem, é preciso saber exatamente a intensidade dos sinais luminosos em cada ponto do ambiente, e coletar esses dados manualmente é extremamente demorado e trabalhoso.

O protótipo usou 36 transmissores LED de alto desempenho, receptores fotodiodo e componentes de suporte, como transistores de potência, amplificadores e conversores analógico-digitais, implementando-os em uma área de 3m x 3m, dividida em 4 grades quadradas, cada uma com um receptor.

As medições foram conduzidas em intervalos de 1 cm nas direções x e y, os dados foram coletados em duas alturas diferentes: 172 cm e 196 cm, e em cada posição de amostragem, a medição foi repetida três vezes para levar em conta a variabilidade.

A pesquisa apresenta soluções inovadoras para tornar o VLP mais viável:

- Desenvolvimento de um método para limpar pontos de dados ruidosos ou errôneos, selecionando a melhor amostra de três testes e interpolando dados ausentes usando informações circundantes;
- Nova forma para gerar impressões digitais de alta granularidade (intervalos de 1 cm) a partir de dados esparsos (intervalos de 8 cm) usando o modelo de radiação Lambertiana;
- Uso da escala Min-Max para normalizar as amostras de dados para um intervalo entre 0 e 1;

- Diversos algoritmos de aprendizado de máquina foram usados para processar os dados dos sinais luminosos e determinar localizações. O método *Random Forest* mostrou-se eficaz.

É utilizada tecnologia de posicionamento bidimensional (2D) como foco principal. Embora o conjunto experimental incluía medições em diferentes alturas, a determinação da posição é realizada exclusivamente no plano 2D. Apesar da consideração do eixo vertical no experimento, o estudo concentra-se em técnicas de posicionamento 2D, com possibilidade de extensão para 3D em trabalhos futuros.

No que tange avaliação de desempenho, o estudo usou várias métricas, como erro médio de posicionamento, erros de posicionamento de 90% e função de distribuição cumulativa (CDF) de erros de posicionamento. Também foram analisadas as configurações de LED para entender o impacto da densidade do transmissor na precisão do posicionamento.

O modelo foi comprimido via TensorFlow Lite Micro para obter um modelo quantitativo, o qual foi reduzido de 5,3 MB para 1,27 MB. Posteriormente ele foi avaliado em um Arduino Nano.

Os resultados foram:

- Alta precisão, com erro médio de apenas 1,7 cm;
- Redução de 98% da quantidade de dados necessários para coleta manual;
- Compatibilidade com dispositivos limitados e de baixa potência (IoT).

É importante citar que o sistema funciona melhor quando o dispositivo que recebe os sinais de luz é mantido na horizontal e que o ambiente de testes é considerando homogêneo e inalterado. Nota-se também que a precisão depende da quantidade e do arranjo das luzes LED na área.

3.2.5 Caracterização do Estado da Arte

A definição de um paradigma no trabalho de Gao et al. (2022b) contempla o uso da tecnologia 5G combinada com técnicas de aprendizado profundo. A pesquisa é inédita no uso do *Multilevel-FSM* para geração de conjunto de dados, no método de síntese de recursos usando CFR e no método de posicionamento de aprendizado profundo MPRI. As novidades são capazes de corrigir hipóteses de estudos anteriores, apresentarem compatibilidade com os padrões 5G atuais, além de apresentar desempenho superior em posicionamento de alta precisão 5G.

O estudo de Guo et al. (2022) se baseia em conceitos existentes, como posicionamento Wi-Fi (RSS e RTT), rastreamento baseado em IMU e filtragem de Kalman. A combinação específica de técnicas, a nova estratégia de controle de qualidade (OQECs) e a abordagem de filtragem robusta adaptável (ARKF) apontam ser contribuições de última geração para o campo de posicionamento interno. O trabalho sugere um avanço significativo de precisão em relação às técnicas anteriores.

Embora a pesquisa de Zhu et al. (2023) se baseie no conhecimento existente em VLP, a metodologia é inédita para luminárias circulares isentas de uma IMU, além de não apresentar limitações de ângulo de inclinação. Os algoritmos V-PCA e OA-V-PA propostos parecem ser originais, assim como o processamento de imagem fundida. Essas contribuições reduzem o número de luminárias necessárias e apresentam melhorias significativas na precisão de posicionamento em comparação aos métodos existentes.

O trabalho de Zhu et al. (2024) trata conceitos existentes em VLP baseado em RSS e aprendizado de máquina. Os métodos de limpeza de dados, aumento de dados e implementação em dispositivos com recursos limitados parece ser uma contribuição única para o campo. Os ganhos se dão principalmente em eficiência, visto que o esforço de coleta de impressões digitais sobre dados reais é drasticamente reduzido. Também atinge-se menores erros de posicionamento quando comparado a trabalhos anteriores.

3.2.6 Tendências de Pesquisa e Sua Distribuição Geográfica

A catalogação dos resumos dos artigos, juntamente com a análise dos países de origem e dos anos de publicação, permitiu identificar informações relevantes sobre as tendências de pesquisa, destacando-se os seguintes aspectos:

- 2021: Expansão de Tecnologias Específicas
 - Popularidade de Wi-Fi e Bluetooth para métodos de *fingerprinting* e localização baseada em *Received Signal Strength Indicator* (RSSI);
 - Crescente uso de *Ultra-Wideband* (UWB) e integração de múltiplos sensores como *Inertial Navigation System* (INS), PDR e Wi-Fi;
 - Métodos de fusão de sensores para aumentar a precisão em ambientes indoor;
 - Algoritmos baseados em aprendizado de máquina, como redes neurais convolucionais (CNNs).
- 2022: Otimização de Algoritmos e Modelos Híbridos
 - Integração do 5G com outras tecnologias para serviços indoor-outdoor;
 - Desenvolvimento de modelos baseados em redes profundas, como redes siamesas e filtro de Kalman;
 - Adoção de algoritmos híbridos como *Particle Swarm Optimization* (PSO) e *Long Short-Term Memory* (LSTM), com foco em ambientes complexos (ex.: NLOS).
- 2023: Sustentabilidade, Custo e Eficiência
 - Propostas para reduzir custos de implementação, como *crowdsourcing* e simplificação de mapeamentos;
 - Sistemas robustos para ambientes com baixa densidade de pontos de acesso (APs);

- Aplicações práticas, como navegação para drones e veículos autônomos.
- 2024: Tecnologias Emergentes
 - Destaque para 5G e VLP devido à alta precisão e integração com infraestruturas existentes;
 - Foco em soluções práticas para fábricas inteligentes, robôs móveis e agricultura;
 - Mitigação de efeitos de luz ambiente e variabilidade temporal em sistemas de VLP.

A distribuição geográfica dos artigos analisados oferece uma visão sobre os países e continentes que mais contribuíram para a produção científica na área estudada, com foco em seus maiores pontos de interesse.

- China
 - Líder em produção acadêmica, com foco em Wi-Fi, BLE, UWB, VLP e integração de sensores;
 - Uso intensivo de aprendizado profundo e soluções práticas como *Simultaneous Localization and Mapping* (SLAM) para robôs e agricultura.
- Europa
 - Avanço em métodos baseados em luz visível (VLP) e eficiência computacional para dispositivos embarcados;
 - Soluções colaborativas com ênfase em privacidade e descentralização.
- América
 - Progresso em sistemas híbridos e técnicas de otimização, como algoritmos de aprendizado para fusão de sensores;
 - Aplicações práticas em IoT e robôs autônomos.
- Ásia
 - Foco em métodos de *fingerprinting* com Wi-Fi e BLE para ambientes de alta densidade;
 - Interesse crescente em segurança, privacidade e escalabilidade de redes de sensores.

3.2.7 Abordagem de Incerteza de Medição

A incerteza de medição desempenha um papel central na avaliação e desenvolvimento de IPS, sendo tratada de diversas formas nos estudos analisados. Estratégias voltadas à redução de incertezas e à robustez dos métodos frente a ruídos e variabilidades demonstram a importância de compreender e mitigar fatores que afetam a precisão.

Uma abordagem comum é o uso de aumento e limpeza de dados. A introdução de ruídos controlados, como diferentes relações sinal-ruído (SNRs), permite avaliar a

robustez dos métodos, enquanto técnicas de limpeza de dados, como médias múltiplas e interpolação, ajudam a mitigar o impacto de valores atípicos e dados ausentes. Tais práticas buscam garantir maior consistência nos resultados, mesmo diante de variações nas condições de coleta.

O uso de métricas estatísticas também é recorrente. Medidas como desvio padrão, erro médio de posicionamento e a função de distribuição cumulativa (CDF) são empregadas para quantificar a dispersão e a confiabilidade do sistema em diferentes cenários. Simulações controladas, por sua vez, possibilitam avaliar o impacto de variáveis externas, como o ruído de imagem e a perda de caminho em sinais sem fio.

Adicionalmente, métodos adaptativos, como o filtro de Kalman robusto, incorporam fatores para gerenciar perturbações no modelo dinâmico e em observações contaminadas, aumentando a precisão das estimativas. Estratégias específicas, como a inflação de variância e detecção de movimento, demonstram uma preocupação em lidar com incertezas tanto nos modelos quanto nos dados coletados.

Outro aspecto relevante é a validação em múltiplos cenários, como ambientes internos e urbanos, o que evidencia a importância de considerar incertezas relacionadas à generalização dos métodos. Comparações com técnicas existentes também ajudam a situar o desempenho relativo das abordagens propostas.

Por fim, estratégias baseadas em modelagem e simulações, como a modelagem de ruído de imagem e métodos para tratar oclusões, destacam a busca por soluções que antecipem e mitiguem desafios práticos. Essas análises demonstram que o entendimento da incerteza vai além de sua quantificação, envolvendo a criação de métodos que integram robustez e adaptabilidade frente a diferentes condições e cenários.

A Tabela 4 apresenta os erros de posicionamento experimentados por tecnologia. Convém destacar que, devido à variação nos cenários de teste, as grandezas apresentam limitações quanto à comparabilidade.

Tabela 4 – Precisões por Tecnologia

Autores	Tecnologias	Erro de Posicionamento
Gao et al. (2022b)	5G e ML	280 mm
Guo et al. (2022)	Wi-Fi, PDR e IMU	570 mm
Zhu et al. (2023)	VLP e V-PA	50 mm
Zhu et al. (2024)	VLP, RSS e ML	17 mm

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.8 Limitações

As limitações apontadas nos estudos revisados destacam desafios significativos no desenvolvimento de tecnologias de IPS em redes 5G. Uma das barreiras é a ausência de estações base 5G comercialmente disponíveis e a escassez de conjuntos de dados públicos de alta qualidade. Essa lacuna limita a validação empírica de métodos propostos, restringindo o avanço da pesquisa em ambientes reais. Além disso, a criação de conjuntos de dados sintetizados enfrenta problemas como granularidade inadequada ou detalhes excessivos, comprometendo sua representatividade.

A complexidade computacional é outro ponto crítico, especialmente para a implementação em dispositivos com recursos limitados, como IoT. Modelos de aprendizado profundo, embora eficazes, podem não ser viáveis em plataformas embarcadas devido a suas demandas de memória e processamento. Esses desafios também incluem o balanceamento entre eficiência e precisão, já que melhorias em um aspecto frequentemente comprometem o outro.

Outras insuficiências surgem da limitação de cenários estáticos e da dificuldade de generalização para condições dinâmicas e bandas de frequência distintas. Adicionalmente, fatores como a dependência de configurações específicas de hardware, como LEDs e sensores inerciais de baixo custo, limitam a aplicabilidade em diferentes cenários. A ausência de soluções universalmente aplicáveis para ambientes internos reflete outra barreira importante na área.

Do ponto de vista prático, dificuldades relacionadas à manutenção de bancos de dados e avaliação em tempo real também emergem como barreiras. Essas questões são agravadas por condições ambientais variáveis e imprevisibilidade no comportamento do usuário, que aumentam a complexidade de sistemas de posicionamento interno.

Por fim, apesar de avanços em métodos robustos, como o uso de imagens CFR e posicionamento visual, desafios como ruídos de dados, erros de aproximação e complexidade de processamento em tempo real continuam a demandar soluções inovadoras. Assim, as lacunas mais relevantes estão relacionadas à validação em condições reais, à escalabilidade de sistemas para cenários amplos e complexos e à criação de métodos de baixo custo e alta eficiência, capazes de lidar com as adversidades dos ambientes internos.

4 CONCLUSÕES

Este estudo realizou uma revisão sistemática da literatura para investigar a evolução das tecnologias de posicionamento *indoor* (IPS). Os resultados mostraram que a área tem passado por significativos avanços, com aumento na integração de tecnologias emergentes, como aprendizado de máquina, sistemas baseados em luz visível e fusão de sensores. A análise bibliométrica destacou um crescimento contínuo das publicações, com maior concentração em países como China e Estados Unidos, que lideram tanto em volume quanto em impacto científico.

A revisão identificou lacunas importantes, incluindo limitações relacionadas à aplicação em cenários dinâmicos, na localização de pequenos objetos, dependência de hardware robusto e desafios de escalabilidade para ambientes complexos. Esses obstáculos apontam para a necessidade de mais pesquisas voltadas à criação de soluções universais e de baixo custo, capazes de lidar com a variabilidade de ambientes internos.

Os principais avanços destacados incluem melhorias na precisão por meio de técnicas de aprendizado profundo e a introdução de métodos inovadores, como o uso de 5G para posicionamento de alta precisão e algoritmos robustos adaptáveis a condições desafiadoras. Essas contribuições têm potencial para transformar o campo, permitindo aplicações práticas em áreas como IoT, logística e navegação em ambientes internos.

Um aspecto a ser considerado no trabalho foi a quantidade de artigos selecionados na triagem final, que, se ampliada, poderia enriquecer a análise realizada, oferecendo um entendimento mais completo e aprofundado sobre o tema.

Por fim, os resultados reforçam a relevância de revisões sistemáticas como ferramentas essenciais para consolidar o conhecimento existente, identificar lacunas e orientar futuras pesquisas. A evolução contínua das tecnologias de IPS evidencia o potencial de impacto científico dessa área, abrindo novos horizontes e contribuindo para o avanço tecnológico.

REFERÊNCIAS

- ALITALESHI, A.; JAZAYERIY, H.; KAZEMITABAR, J. Ea-cnn: A smart indoor 3d positioning scheme based on wi-fi fingerprinting and deep learning. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 117, 2023. ISSN 09521976.
- ARANDA, F. J. et al. Performance analysis of fingerprinting indoor positioning methods with ble. **Expert Systems with Applications**, v. 202, 2022.
- BAKAR, A. H. A. et al. Accurate visible light positioning using multiple-photodiode receiver and machine learning. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 70, 2021.
- BERNARDINI, F. et al. Robot-based indoor positioning of uhf-rfid tags: The sar method with multiple trajectories. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 70, 2021.
- BI, J. et al. Inverse distance weight-assisted particle swarm optimized indoor localization. **Applied Soft Computing**, v. 164, 2024.
- BI, J. et al. Psovrpos: Wifi indoor positioning using svr optimized by pso. **Expert Systems with Applications**, v. 222, 2023.
- BRENA, R. F. et al. Evolution of indoor positioning technologies: A survey. **Journal of Sensors**, v. 2017, 2017.
- CAO, C. et al. An accurate positioning method based on time-division strategy for indoor moving target. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 72, 2023.
- CAO, S.; CHEN, X. Doppler shift mitigation in acoustic positioning based on relative speed of base station for smartphones. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 71, 2022.
- CAO, X. et al. Deep-learning-enhanced visible light positioning system based on the led array. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 11, n. 12, p. 21985 – 21995, 2024.
- CAPPELLI, I. et al. Enhanced visible light localization based on machine learning and optimized fingerprinting in wireless sensor networks. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 72, 2023.
- CAROTENUTO, R.; IERO, D.; MERENDA, M. Advanced sensors and systems technologies for indoor positioning. **Sensors**, v. 22, 2022.
- CASANOVA-MARQUÉS, R. et al. Maximizing privacy and security of collaborative indoor positioning using zero-knowledge proofs. **Internet of Things (Netherlands)**, v. 22, 2023.
- CHEN, C.-Y. et al. Optimization and evaluation of multidetector deep neural network for high-accuracy wi-fi fingerprint positioning. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 9, n. 16, p. 15204 – 15214, 2022.

- CHEN, P.; ZHANG, S. Deepmetricfi: Improving wi-fi fingerprinting localization by deep metric learning. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 11, n. 4, p. 6961 – 6971, 2024.
- CHEN, R. et al. Precise indoor positioning based on acoustic ranging in smartphone. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 70, 2021.
- CHIU, C.-J.; CHAN, F.-C.; FENG, K.-T. Skeleton-based positioning and reference point deployment for hybrid wireless localization. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 71, n. 5, p. 5404 – 5414, 2022.
- CHOI, J.; CHOI, Y.-S. Calibration-free positioning technique using wi-fi ranging and built-in sensors of mobile devices. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 8, n. 1, p. 541 – 554, 2021.
- CUI, Z. et al. Los/nlos identification for indoor uwb positioning based on morlet wavelet transform and convolutional neural networks. **IEEE Communications Letters**, v. 25, n. 3, p. 879 – 882, 2021.
- DING, Y. et al. Ogi-slam2: A hybrid map slam framework grounded in inertial-based slam. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 71, 2022.
- DONG, M. et al. A non-line-of-sight mitigation method for indoor ultra-wideband localization with multiple walls. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 19, n. 7, p. 8183 – 8195, 2023.
- DOU, Z. et al. A lidar-assisted self-localization technology for indoor wireless sensor networks. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 10, n. 19, p. 17515 – 17529, 2023.
- EL-SHEIMY, N.; LI, Y. Indoor navigation: state of the art and future trends. **Satellite Navigation**, v. 2, 2021.
- FENG, D. et al. An adaptive iuwb fusion method for nlos indoor positioning and navigation. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 10, n. 13, p. 11414 – 11428, 2023.
- FONTAINE, J. et al. Ultra wideband (uwb) localization using active cir-based fingerprinting. **IEEE Communications Letters**, v. 27, n. 5, p. 1322 – 1326, 2023.
- GABBRIELLI, A. et al. Rails: 3-d real-time angle of arrival ultrasonic indoor localization system. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 72, 2023.
- GAO, C. et al. A uav-based explore-then-exploit system for autonomous indoor facility inspection and scene reconstruction. **Automation in Construction**, v. 148, 2023.
- GAO, F. et al. Prior area searching for energy-based sound source localization. **Science China Information Sciences**, v. 65, n. 12, 2022.
- GAO, K. et al. Toward 5g nr high-precision indoor positioning via channel frequency response: A new paradigm and dataset generation method. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 40, 2022. ISSN 15580008.
- GEOK, T. K. et al. Review of indoor positioning: Radio wave technology. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 11, 2021.

GONG, L. et al. Preciseslam: Robust, real-time, lidar-inertial-ultrasonic tightly-coupled slam with ultraprecise positioning for plant factories. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 20, n. 6, p. 8818 – 8827, 2024.

GUO, B. et al. Wepos:weak-supervised indoor positioning with unlabeled wifi for on-demand delivery. **Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies**, v. 6, n. 2, 2022.

GUO, G. et al. Large-scale indoor localization solution for pervasive smartphones using corrected acoustic signals and data-driven pdr. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 10, n. 17, p. 15338 – 15349, 2023.

GUO, G. et al. A robust integration platform of wi-fi rtt, rss signal, and mems-imu for locating commercial smartphone indoors. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 9, 2022. ISSN 23274662.

HE, Y.-W.; HSU, T.-T.; TSENG, P.-H. A semi-supervised ladder network-based indoor localization using channel state information. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 71, 2022.

HU, Z. et al. An adaptive lighting indoor vslam with limited on-device resources. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 11, n. 17, p. 28863 – 28875, 2024.

HUANG, J. et al. Vwr-slam: Tightly coupled slam system based on visible light positioning landmark, wheel odometer, and rgb-d camera. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 72, 2023.

IVEY, C.; CRUM, J. Choosing the right citation management tool: Endnote, mendeley, reworks, or zotero. **Journal of the Medical Library Association**, v. 106, 2018.

JANG, B.; KIM, H.; KIM, J. wook. Survey of landmark-based indoor positioning technologies. **Information Fusion**, Elsevier B.V., v. 89, p. 166–188, 2023. ISSN 15662535.

JIA, B. et al. A fingerprint-based localization algorithm based on lstm and data expansion method for sparse samples. **Future Generation Computer Systems**, v. 137, p. 380 – 393, 2022.

JIA, S. et al. A novel visual indoor positioning method with efficient image deblurring. **IEEE Transactions on Mobile Computing**, v. 22, n. 7, p. 3757 – 3773, 2023.

JIANG, W. et al. Indoor and outdoor seamless positioning method using uwb enhanced multi-sensor tightly-coupled integration. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 70, n. 10, p. 10633 – 10645, 2021.

KIRMAZ, A. et al. Toa and tdoa estimation using artificial neural networks for high-accuracy ranging. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 41, n. 12, p. 3816 – 3830, 2023.

KO, C.-H.; WU, S.-H. A framework for proactive indoor positioning in densely deployed wifi networks. **IEEE Transactions on Mobile Computing**, v. 21, n. 1, p. 1 – 15, 2022.

KONG, X. et al. Hybrid indoor positioning method of ble and monocular vins-based smartphone. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 72, 2023.

KONG, X. et al. Hybrid indoor positioning method of ble and pdr based on adaptive feedback ekf with low ble deployment density. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 72, 2023.

KUANG, J. et al. Consumer-grade inertial measurement units enhanced indoor magnetic field matching positioning scheme. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 72, 2023.

LI, A. et al. A cluster-principal-component-analysis-based indoor positioning algorithm. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 8, n. 1, p. 187 – 196, 2021.

LI, H.; ELNAHAS, O.; QUAN, Z. Tdoa-based indoor localization via linear fusion with low-rank matrix approximation. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 11, n. 6, p. 10635 – 10647, 2024.

LI, M. et al. Millimeter-precision positioning for wide-angle indoor area enabled by metalens-integrated camera. **Nanophotonics**, v. 13, n. 22, p. 4101 – 4110, 2024.

LI, Q. et al. Indoor localization based on csi fingerprint by siamese convolution neural network. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 70, n. 11, p. 12168 – 12173, 2021.

LI, X. et al. Kernel-based online prediction algorithms for indoor localization in internet of things. **Expert Systems with Applications**, v. 217, 2023.

LI, Z. et al. Wifi-rita positioning: Enhanced crowdsourcing positioning based on massive noisy user traces. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, v. 20, n. 6, p. 3785 – 3799, 2021.

LIN, H. et al. Two-stage clustering for improve indoor positioning accuracy. **Automation in Construction**, v. 154, 2023.

LIU, M. et al. Passive location estimation via resonant beam. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 72, n. 10, p. 13055 – 13066, 2023.

LIU, R. et al. Indoor visible light positioning based on improved whale optimization method with min-max algorithm. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 72, 2023.

LIU, T. et al. Tightly coupled integration of gnss/uwb/vio for reliable and seamless positioning. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 25, n. 2, p. 2116 – 2128, 2024.

LIU, X. et al. Cognitive indoor positioning using sparse visible light source. **IEEE Transactions on Computational Social Systems**, v. 9, n. 6, p. 1682 – 1692, 2022.

LYU, P. et al. A factor graph optimization method for high-precision imu-based navigation system. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 72, 2023.

MA, C. et al. Wi-fi rtt ranging performance characterization and positioning system design. **IEEE Transactions on Mobile Computing**, v. 21, n. 2, p. 740 – 756, 2022.

- MA, L.; ZHANG, Y.; QIN, D. A novel indoor fingerprint localization system based on distance metric learning and ap selection. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 71, 2022.
- MARVELMIND. **IPS Architecture**. 2019. Disponível em: <https://marvelmind.com>.
- MAUTZ, R. Indoor positioning technologies habilitation thesis. **ETH Zurich, Department of Civil, Environmental and Geomatic Engineering, Institute of Geodesy and Photogrammetry**, 2012.
- MEHRABIAN, H.; RAVANMEHR, R. Sensor fusion for indoor positioning system through improved rssi and pdr methods. **Future Generation Computer Systems**, v. 138, p. 254 – 269, 2023.
- PAGE, M. J. et al. The prisma 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. **The BMJ**, v. 372, 2021. Tabela 1 contém estrutura de um paper de revisão bibliográfica.
- PENDAO, C.; MOREIRA, A. Fastgraph enhanced: High accuracy automatic indoor navigation and mapping. **IEEE Transactions on Mobile Computing**, v. 20, n. 3, p. 1027 – 1045, 2021.
- RECHE, A. Y. U. et al. Integrated product development process and green supply chain management: Contributions, limitations and applications. **Journal of Cleaner Production**, v. 249, 2020.
- RUAN, Y. et al. Ipos-5g: Indoor positioning via commercial 5g nr csi. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 10, n. 10, p. 8718 – 8733, 2023.
- SADHUKHAN, P. et al. An efficient clustering with robust outlier mitigation for wi-fi fingerprint based indoor positioning. **Applied Soft Computing**, v. 109, 2021.
- SARTAYEVA, Y.; CHAN, H. C. A survey on indoor positioning security and privacy. **Computers and Security**, v. 131, 2023.
- SARTAYEVA, Y. et al. A survey of indoor positioning systems based on a six-layer model. **Computer Networks**, v. 237, 2023.
- SHAO, W. et al. Particle filter reinforcement via context-sensing for smartphone-based pedestrian dead reckoning. **IEEE Communications Letters**, v. 25, n. 9, p. 3144 – 3148, 2021.
- SHI, L.-F.; YU, M.-X.; YIN, W. Pdr/geomagnetic fusion localization method based on aofa-improved particle filter. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 71, 2022.
- SINGH, V. K. et al. The journal coverage of web of science, scopus and dimensions: A comparative analysis. **Scientometrics**, v. 126, 2021.
- SUN, M. et al. Simultaneous wifi ranging compensation and localization for indoor nlos environments. **IEEE Communications Letters**, v. 26, n. 9, p. 2052 – 2056, 2022.
- SUN, X. et al. Rss-based visible light positioning using nonlinear optimization. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 9, n. 15, p. 14137 – 14150, 2022.

SYAZWANI, C. J. et al. Indoor positioning system: A review. **International Journal of Advanced Computer Science and Applications**, v. 13, 2022.

TORRES-SOSPEDRA, J. et al. A comprehensive and reproducible comparison of clustering and optimization rules in wi-fi fingerprinting. **IEEE Transactions on Mobile Computing**, v. 21, n. 3, p. 769 – 782, 2022.

TRAN, H. Q.; HA, C. Machine learning in indoor visible light positioning systems: A review. **Neurocomputing**, v. 491, p. 117 – 131, 2022.

WAN, R. et al. Csi-based mimo indoor positioning using attention-aided deep learning. **IEEE Communications Letters**, v. 28, n. 1, p. 53 – 57, 2024.

WANG, C. et al. Secure and reliable indoor localization based on multitask collaborative learning for large-scale buildings. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 9, n. 22, p. 22291 – 22303, 2022.

WANG, J. et al. Fedins2: A federated-edge-learning-based inertial navigation system with segment fusion. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 11, n. 2, p. 3653 – 3661, 2024.

WANG, J. et al. Multi-classification of uwb signal propagation channels based on one-dimensional wavelet packet analysis and cnn. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 71, n. 8, p. 8534 – 8547, 2022.

WANG, L. et al. Rsar: A new method for accurate localization of tagged objects via rfid-equipped robots. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 72, 2023.

WANG, Q. et al. Multiscale transformer and attention mechanism for magnetic spatiotemporal sequence localization. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 11, n. 11, p. 19454 – 19469, 2024.

WANG, X. et al. Tightly coupled integration of pedestrian dead reckoning and bluetooth based on filter and optimizer. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 10, n. 8, p. 7327 – 7342, 2023.

WANG, Z. et al. Privacy-preserving indoor localization based on inner product encryption in a cloud environment. **Knowledge-Based Systems**, v. 239, 2022.

WU, C. et al. Ensemble strategy utilizing a broad learning system for indoor fingerprint localization. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 9, n. 4, p. 3011 – 3022, 2022.

WU, Y. et al. Improving autonomous detection in dynamic environments with robust monocular thermal slam system. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 203, p. 265 – 284, 2023.

WU, Y. et al. Indoor surveillance video based feature recognition for pedestrian dead reckoning. **Expert Systems with Applications**, v. 173, 2021.

XIE, Y. et al. Simultaneous localization of scatterers and target user based on indoor prior information in nlos environments. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 71, n. 11, p. 11729 – 11740, 2022.

XU, S. et al. laloc: Audio-chirp-based indoor tracking system - free from imu sensors dependence. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 11, n. 4, p. 6171 – 6184, 2024.

XU, Y. et al. Dual free-size ls-svm assisted maximum correntropy kalman filtering for seamless ins-based integrated drone localization. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 71, n. 8, p. 9845 – 9854, 2024.

YAMASHITA, K. et al. Smart hospital infrastructure: Geomagnetic in-hospital medical worker tracking. **Journal of the American Medical Informatics Association**, v. 28, n. 3, p. 477 – 486, 2021.

YANG, B. et al. Nonuniform-array-based integrated mimo communication and positioning in wireless local area networks. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 10, n. 6, p. 4937 – 4951, 2023.

YANG, J.; ZHAO, X.; LI, Z. Updating radio maps without pain: An enhanced transfer learning approach. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 8, n. 13, p. 10693 – 10705, 2021.

YANG, X. et al. RatioVp: Ambient light noise evaluation and suppression in the visible light positioning system. **IEEE Transactions on Mobile Computing**, v. 23, n. 5, p. 5755 – 5769, 2024.

YANG, Y. et al. An improved indoor 3-d ultrawideband positioning method by particle swarm optimization algorithm. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 71, 2022.

YONGLIANG, Z. et al. A novel tensor completion based indoor positioning fingerprint recovery method in mobile crowdsensing networks. **IEEE Transactions on Network Science and Engineering**, v. 9, n. 4, p. 2658 – 2672, 2022.

YU, Y. et al. A novel 3-d indoor localization algorithm based on ble and multiple sensors. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 8, n. 11, p. 9359 – 9372, 2021.

YUAN, C. et al. Visual heading-aided pedestrian navigation method based on factor graph in indoor environment. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 71, n. 1, p. 1006 – 1016, 2024.

YUE, Y.; ZHAO, X.; LI, Z. Enhanced and facilitated indoor positioning by visible-light graphslam technique. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 8, n. 2, p. 1183 – 1196, 2021.

ZAFARI, F.; GKELIAS, A.; LEUNG, K. A survey of indoor localization systems and technologies. **IEEE Communications Surveys and Tutorials**, v. 21, p. 2568–2599, 2019.

ZHANG, W. et al. A self-adaptive ap selection algorithm based on multiobjective optimization for indoor wifi positioning. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 8, n. 3, p. 1406 – 1416, 2021.

ZHANG, Y. et al. Autonomous navigation using machine vision and self-designed fiducial marker in a commercial chicken farming house. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 224, 2024.

ZHAO, X. et al. Robust depth-aided visual-inertial-wheel odometry for mobile robots. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 71, n. 8, p. 9161 – 9171, 2024.

ZHAO, X. et al. L1-norm constraint kernel adaptive filtering framework for precise and robust indoor localization under the internet of things. **Information Sciences**, v. 587, p. 206 – 225, 2022.

ZHOU, B. et al. Deepvip: Deep learning-based vehicle indoor positioning using smartphones. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 71, n. 12, p. 13299 – 13309, 2022.

ZHOU, N. et al. An indoor positioning algorithm based on particle filter and neighbor-guided particle optimization for wireless sensor networks. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 73, p. 1 – 16, 2024.

ZHU, R. et al. Centimeter-level indoor visible light positioning. **IEEE Communications Magazine**, v. 62, 2024. ISSN 15581896.

ZHU, Z. et al. Positioning using visible light communications: A perspective arcs approach. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, v. 22, 2023. ISSN 15582248.

ZHU, Z. et al. Visible light positioning with visual odometry: A single luminaire based positioning algorithm. **IEEE Transactions on Communications**, v. 72, n. 8, p. 4978 – 4991, 2024.

APÊNDICE A - VERIFICAÇÃO DE ITENS PRISMA NO TCC

A Tabela apresenta o *checklist* de Page et al. (2021) e o estado de cumprimento de seus itens no Trabalho de Conclusão de Curso (TCC). Objetiva-se fornecer uma visão clara e estruturada sobre quais critérios estabelecidos pelas diretrizes PRISMA foram atendidos, parcialmente atendidos ou não atendidos durante a elaboração do trabalho.

Verificação de Itens PRISMA no TCC

Seção e Tópico	Estado
Título	
Identificação do relatório como revisão sistemática	Cumprido
Resumo	
Resumo estruturado conforme checklist PRISMA	Parcialmente Cumprido
Introdução	
Justificativa do estudo no contexto do conhecimento existente	Cumprido
Objetivos claros da revisão	Cumprido
Métodos	
Critérios de inclusão/exclusão	Cumprido
Fontes de informação	Cumprido
Estratégia de busca	Cumprido
Processo de seleção dos estudos	Cumprido
Processo de extração de dados	Cumprido
Itens de dados	
(a) Resultados e desfechos	Cumprido
(b) Outras variáveis	Cumprido

Seção e Tópico	Estado
Avaliação de risco de viés	Não Cumprido
Medidas de efeito	Não Aplicável
Métodos de síntese	
(a) Critérios para síntese	Cumprido
(b)-(f) Análises avançadas	Parcialmente Cumprido
Avaliação de viés de publicação	Não Cumprido
Avaliação de certeza/confiança	Não Cumprido
Resultados	
Seleção dos estudos	
(a) Processo de triagem	Cumprido
(b) Estudos excluídos	Não Cumprido
Características dos estudos incluídos	Cumprido
Avaliação de risco de viés nos estudos incluídos	Não Cumprido
Resultados individuais dos estudos	Cumprido
Resultados das sínteses	
(a)-(d) Resultados detalhados	Parcialmente Cumprido
Viés de relatório	Não Cumprido
Certeza/confiança na evidência	Não Cumprido
Discussão	
Interpretação geral dos resultados	Cumprido
Limitações das evidências incluídas	Parcialmente Cumprido
Limitações do processo de revisão	Parcialmente Cumprido

Seção e Tópico	Estado
Implicações para prática, política e pesquisa futura	Cumprido
Outras Informações	
Registro e protocolo	Não Aplicável
Fontes de financiamento	Não Aplicável
Conflitos de interesse	Não Aplicável
Disponibilidade de dados e materiais	Não Cumprido

Fonte: Elaborado pelo autor.