



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CARIRI
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO**

JULYANDERSON ALVES CAVALCANTI DE LIMA

**INTERNET DAS COISAS E CIDADES INTELIGENTES: AVANÇOS TECNOLÓGICOS
E DESAFIOS EMERGENTES**

JUAZEIRO DO NORTE - CE

2026

JULYANDERSON ALVES CAVALCANTI DE LIMA

INTERNET DAS COISAS E CIDADES INTELIGENTES: AVANÇOS TECNOLÓGICOS E
DESAFIOS EMERGENTES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Ciência da Computação do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal do Cariri, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Ciência da Computação.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Julian Menezes Araújo

JUAZEIRO DO NORTE - CE

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Cariri
Sistema de Bibliotecas

L732i Lima, Julyanderson Alves Cavalcanti de.
Internet das coisas e cidades inteligentes: avanços tecnológicos e desafios emergentes / Julyanderson Alves Cavalcanti de Lima. – 2026.
51 f. : il. color.

Monografia (Graduação em Ciência da Computação) – Centro de Ciências e Tecnologia, Curso de Graduação em Ciência da Computação, Universidade Federal do Cariri, Juazeiro do Norte - CE, 2026.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Julian Menezes Araújo.

1. Internet das Coisas (IoT). 2. Cidades inteligentes. 3. Computação em borda.
4. Segurança cibernética. 5. Interoperabilidade. I. Araújo, Carlos Julian Menezes (Orient.). II. Universidade Federal do Cariri. III. Título.

CDD 004.678

JULYANDERSON ALVES CAVALCANTI DE LIMA

INTERNET DAS COISAS E CIDADES INTELIGENTES: AVANÇOS TECNOLÓGICOS E
DESAFIOS EMERGENTES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Ciência da Computação
do Centro de Ciências e Tecnologia da Universi-
dade Federal do Cariri, como requisito parcial
à obtenção do grau de bacharel em Ciência da
Computação.

Aprovada em: 06 de abril de 2026

BANCA EXAMINADORA



Documento assinado digitalmente
CARLOS JULIAN MENEZES ARAUJO
Data: 22/04/2026 22:31:20-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Carlos Julian Menezes Araújo (Orientador)
Universidade Federal do Cariri (UFCA)



Documento assinado digitalmente
CAMILA HELENA SOUZA OLIVEIRA
Data: 27/04/2026 14:46:34-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Camila Helena Souza Oliveira
Universidade Federal do Cariri (UFCA)



Documento assinado digitalmente
RAMON SANTOS NEPOMUCENO
Data: 22/04/2026 23:23:30-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Ramon Santos Nepomuceno
Universidade Federal do Cariri (UFCA)

RESUMO

A Internet das Coisas (IoT) tem se consolidado como base tecnológica para a transformação digital das cidades, ao viabilizar monitoramento, automação e suporte à decisão em serviços urbanos. Este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica sobre IoT aplicada a cidades inteligentes, com o objetivo de analisar os principais avanços tecnológicos recentes e os desafios que condicionam sua adoção em escala. A análise evidenciou que a convergência entre infraestrutura de comunicação (5G e LPWAN), computação distribuída (nuvem, borda e névoa), inteligência artificial e integração de sistemas amplia o potencial de eficiência, sustentabilidade e responsividade da gestão pública. Em contrapartida, a literatura aponta barreiras persistentes relacionadas à segurança cibernética, privacidade e governança de dados, interoperabilidade entre plataformas, escalabilidade técnica e sustentabilidade econômica das soluções. Também se observaram lacunas de pesquisa para contextos urbanos brasileiros, especialmente quanto à avaliação empírica de impacto e à adaptação de modelos de implementação à heterogeneidade institucional e socioeconômica local. Conclui-se que a consolidação de cidades inteligentes depende menos da adoção pontual de tecnologias e mais da integração sociotécnica entre inovação, regulação, capacidade institucional e orientação ao interesse público.

Palavras-chave: Internet das Coisas (IoT). Cidades inteligentes. Integração de sistemas. Computação em borda. Governança de dados.

ABSTRACT

The Internet of Things (IoT) has become a foundational technology for urban digital transformation by enabling monitoring, automation, and data-driven decision-making in public services. This study presents a literature review on IoT applied to smart cities, aiming to analyze recent technological advances and the main challenges that affect its large-scale adoption. The findings indicate that the convergence of communication infrastructure (5G and LPWAN), distributed computing (cloud, edge, and fog), artificial intelligence, and systems integration significantly increases the potential for urban efficiency, sustainability, and responsiveness. However, the literature also highlights persistent barriers related to cybersecurity, privacy and data governance, platform interoperability, technical scalability, and long-term economic viability. The review further identifies research gaps in the Brazilian context, especially regarding empirical impact assessment and adaptation of implementation models to local institutional and socioeconomic heterogeneity. The study concludes that smart city consolidation depends less on isolated technology deployment and more on sociotechnical integration among innovation, regulation, institutional capacity, and public-interest orientation.

Keywords: Internet of Things (IoT). Smart cities. Systems integration. Edge computing. Data governance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Arquitetura em Três Camadas de Sistemas IoT	12
Figura 2 – Arquitetura em Cinco Camadas de Sistemas IoT	13
Figura 3 – Arquitetura em Camadas de uma Cidade Inteligente com Fluxo de Dados . .	19

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Mapeamento de tecnologias IoT para aplicações urbanas e atributos críticos	31
---	----

LISTA DE SÍMBOLOS

IoT	Internet das Coisas
AIoT	Integração entre Internet das Coisas e Inteligência Artificial
IA	Inteligência Artificial
5G	Quinta geração de redes móveis
5G-Advanced	Evolução incremental das redes 5G
6G	Sexta geração de redes móveis
LPWAN	Redes de Longa Distância e Baixo Consumo de Energia
NB-IoT	<i>Narrowband Internet of Things</i>
LGPD	Lei Geral de Proteção de Dados
TIC	Tecnologias da informação e comunicação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	11
2.1	Internet das Coisas	11
2.1.1	<i>Arquitetura em Três Camadas</i>	12
2.1.2	<i>Arquitetura em Cinco Camadas</i>	13
2.1.3	<i>Tecnologias e Protocolos de IoT</i>	14
2.1.3.1	<i>Protocolos de Comunicação</i>	14
2.1.3.2	<i>MQTT (Message Queuing Telemetry Transport)</i>	14
2.1.3.3	<i>CoAP (Constrained Application Protocol)</i>	15
2.1.3.4	<i>HTTP/HTTPS</i>	15
2.1.4	<i>Tecnologias de Conectividade</i>	15
2.1.4.1	<i>Wi-Fi</i>	15
2.1.4.2	<i>Bluetooth e Bluetooth Low Energy (BLE)</i>	16
2.1.4.3	<i>LoRaWAN (Long Range Wide Area Network)</i>	16
2.1.4.4	<i>5G</i>	16
2.1.5	<i>IPv6 e Endereçamento</i>	17
2.2	Cidades Inteligentes	17
2.2.1	<i>Relação entre IoT e Cidades Inteligentes</i>	18
2.2.2	<i>Arquitetura de uma Cidade Inteligente</i>	18
2.2.3	<i>Principais Aplicações</i>	20
3	METODOLOGIA	21
3.1	Procedimentos de Busca Bibliográfica	21
3.2	Estratégia de Seleção de Artigos	21
3.3	CrITÉrios de Inclusão	22
3.4	Análise e Síntese dos Trabalhos	22
3.5	Objetivos e Contribuições Esperadas	23
4	AVANÇOS TECNOLÓGICOS	24
4.1	Infraestrutura de Comunicação	24
4.2	Computação em Nuvem e Edge	25
4.2.1	<i>Computação em Nuvem</i>	26

4.2.2	<i>Computação em Borda (Edge Computing)</i>	27
4.2.3	<i>Arquitetura Híbrida: Fog Computing</i>	27
4.2.4	<i>Desafios e Oportunidades</i>	28
4.3	Inteligência Artificial	28
4.3.1	<i>Principais abordagens de IA aplicadas às cidades inteligentes</i>	29
4.3.2	<i>Aplicações estratégicas da IA em serviços urbanos</i>	29
4.3.3	<i>Desafios técnicos e de governança</i>	30
4.4	Mapeamento de Tecnologias para Aplicações Urbanas	30
4.5	Integração de Sistemas	31
4.5.1	<i>Dimensões da integração em cidades inteligentes</i>	31
4.5.2	<i>Padrões, dados e plataformas de interoperabilidade</i>	32
5	DESAFIOS EMERGENTES	34
5.1	Segurança	34
5.2	Privacidade	35
5.3	Escalabilidade	36
5.4	Interoperabilidade	37
5.5	Questões Econômicas	38
6	SÍNTESE CRÍTICA DA LITERATURA	40
6.1	Convergência de tecnologias como fator de viabilidade	40
6.2	O paradoxo entre potencial técnico e viabilidade operacional	40
6.3	Segurança e privacidade: riscos subestimados na adoção	40
6.4	Comparação de convergências e divergências	41
6.5	Lacunas em pesquisa sobre modelos de integração urbana	41
6.6	Síntese de recomendações para pesquisa futura com foco operacional	42
6.7	Contexto Brasil: especificidades e desafios	42
6.7.1	<i>Capacidade Institucional e Governança</i>	43
6.7.2	<i>Marco Regulatório e Conformidade</i>	43
6.8	Lacunas por categoria	44
6.9	Conclusão da síntese	44
7	CONCLUSÃO	46
	REFERÊNCIAS	48

1 INTRODUÇÃO

A Internet das Coisas (IoT) tem se consolidado como uma das tecnologias mais transformadoras das últimas décadas, conectando objetos físicos a redes digitais e possibilitando a coleta, troca e análise de dados em larga escala (SANTOS *et al.*, 2016). Uma das consequências mais marcantes desse avanço é o surgimento de cidades cada vez mais integradas, nas quais dispositivos, sensores e sistemas inteligentes se comunicam para otimizar serviços públicos, melhorar a mobilidade urbana, aumentar a eficiência energética e aprimorar a qualidade de vida da população (ZANELLA *et al.*, 2014).

Nos últimos anos, o ecossistema IoT passou por uma rápida evolução tecnológica, com o surgimento e a consolidação de soluções como redes 5G, computação de borda (*edge computing*), computação em névoa (*fog computing*), inteligência artificial embarcada e blockchain (ZAMAN *et al.*, 2024; WHAIDUZZAMAN *et al.*, 2022). Esses avanços ampliaram significativamente o potencial de aplicação da IoT em cidades inteligentes, permitindo maior conectividade, automação e análise preditiva de dados. No entanto, também introduziram novos desafios, como a complexidade de interoperabilidade entre diferentes sistemas, o aumento das vulnerabilidades de segurança, a necessidade de regulamentações adequadas e as desigualdades de infraestrutura tecnológica entre diferentes regiões (SINGH *et al.*, 2022).

Diante desse cenário, o presente trabalho propõe a realização de uma **revisão narrativa da literatura** voltada à análise da evolução da Internet das Coisas e de seu papel na consolidação das cidades inteligentes, com foco nas tecnologias emergentes que vêm sendo desenvolvidas e nos desafios decorrentes de sua adoção. Busca-se compreender como essas inovações têm sido aplicadas para transformar o espaço urbano e quais barreiras ainda limitam sua implementação em larga escala, especialmente no contexto brasileiro.

A realização desta revisão da literatura se justifica pela necessidade de compreender de forma crítica e atualizada as tendências tecnológicas e os desafios relacionados à aplicação da IoT em cidades inteligentes. Essa compreensão é fundamental para subsidiar futuras pesquisas, orientar políticas públicas e apoiar a formulação de estratégias voltadas à construção de cidades mais eficientes, sustentáveis e inclusivas, alinhadas às demandas da sociedade contemporânea.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica deste trabalho estabelece os conceitos e relações que sustentam a análise proposta sobre Internet das Coisas e cidades inteligentes. Nesta etapa, são apresentados os principais referenciais da literatura para delimitar o recorte conceitual adotado, evidenciar a evolução dos temas e organizar a discussão sobre seus desdobramentos técnicos e institucionais no contexto urbano. Com isso, busca-se construir uma base analítica consistente para as seções seguintes.

2.1 Internet das Coisas

A Internet das Coisas (IoT - *Internet of Things*) representa uma evolução paradigmática na forma como computadores e dispositivos se conectam e trocam informações. Diferentemente dos sistemas computacionais tradicionais, a IoT envolve objetos do dia a dia equipados com sensores, sistemas de processamento, conectividade e software que lhes permitem coletar, compartilhar e agir sobre dados sem a intervenção humana direta (ATZORI *et al.*, 2010).

Do ponto de vista arquitetural, dois modelos são recorrentes. O **modelo de três camadas** (percepção, rede e aplicação) oferece uma visão sintética do funcionamento da IoT. Já o **modelo expandido de cinco camadas** adiciona processamento/intermediação e camada de negócios/governança, permitindo analisar requisitos de interoperabilidade, segurança, privacidade e sustentabilidade econômica de forma mais completa (SINGH *et al.*, 2022; ZAMAN *et al.*, 2024). Em pesquisas orientadas a cidades inteligentes, esse segundo modelo é particularmente útil por explicitar que desempenho técnico depende também de coordenação institucional e regras de uso dos dados.

No contexto urbano, a IoT opera como infraestrutura de inteligência distribuída: sensores e atuadores capturam eventos da cidade, redes heterogêneas transportam informações, plataformas analíticas transformam dados em conhecimento e sistemas de gestão convertem esse conhecimento em políticas e respostas operacionais (OLIVEIRA *et al.*, 2021). Assim, a evolução recente da IoT com 5G, edge/fog e IA amplia seu potencial, mas também torna mais críticos os desafios de padronização, segurança e governança para implementação em escala (WHAIDUZZAMAN *et al.*, 2022; SINGH *et al.*, 2022).

2.1.1 Arquitetura em Três Camadas

O modelo de arquitetura em três camadas é um dos mais simples e amplamente utilizados na representação de sistemas IoT. Este modelo divide o sistema em três níveis hierárquicos distintos:

- **Camada de Percepção:** Também conhecida como camada de dispositivos ou sensores, é responsável pela coleta de dados do ambiente físico. Esta camada inclui sensores (temperatura, umidade, movimento, luz), atuadores e controladores que capturam informações e interagem com o mundo real. Os dispositivos nesta camada geralmente possuem capacidades computacionais limitadas e recursos restritos (ATZORI *et al.*, 2010).
- **Camada de Rede:** Responsável pela transmissão e roteamento de dados entre dispositivos e servidores. Esta camada utiliza diversos protocolos de comunicação como Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee e LoRaWAN para estabelecer conectividade. Seu principal desafio é garantir a confiabilidade e eficiência na transmissão de dados, frequentemente com largura de banda limitada.
- **Camada de Aplicação:** Camada superior onde os dados são processados, armazenados e analisados. Aqui encontram-se os servidores, bancos de dados e aplicações que utilizam os dados para gerar inteligência e tomar decisões. Esta camada fornece interfaces aos usuários e realiza análises complexas dos dados coletados.

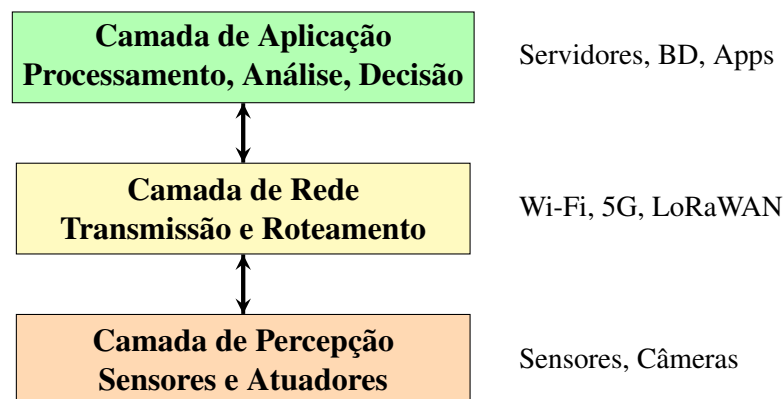


Figura 1 – Arquitetura em Três Camadas de Sistemas IoT

A figura 1 ilustra a estrutura hierárquica do modelo de três camadas, destacando as funções e componentes de cada nível. Embora seja um modelo simplificado, ele é útil para entender os fundamentos da IoT e serve como base para arquiteturas mais complexas, como a arquitetura em cinco camadas, que aborda aspectos adicionais de processamento e governança.

2.1.2 Arquitetura em Cinco Camadas

Para abordar as limitações do modelo de três camadas, a arquitetura em cinco camadas propõe uma divisão mais granular, inserindo camadas intermediárias de processamento e gerenciamento. Este modelo é particularmente relevante em cenários de computação em borda (Edge Computing) (ATZORI *et al.*, 2010):

- **Camada 1 – Percepção:** Idêntica à camada de percepção do modelo de três camadas, responsável pela coleta de dados através de sensores e atuadores.
- **Camada 2 – Transporte:** Responsável pela transmissão confiável de dados, incluindo funções de roteamento, switching e conectividade. Assegura que os dados cheguem ao seu destino com integridade e segurança.
- **Camada 3 – Processamento:** Uma camada intermediária de processamento e armazenamento local. Nesta camada ocorre o processamento em borda, reduzindo a latência e a quantidade de dados enviados para a nuvem.
- **Camada 4 – Aplicação:** Responsável pelas aplicações e serviços que processam os dados. Fornece interfaces aos usuários e implementa a lógica de negócio.
- **Camada 5 – Negócio:** Camada mais alta, responsável pelo gerenciamento geral do sistema, relacionamento com usuários, estabelecimento de políticas e tomada de decisões estratégicas.

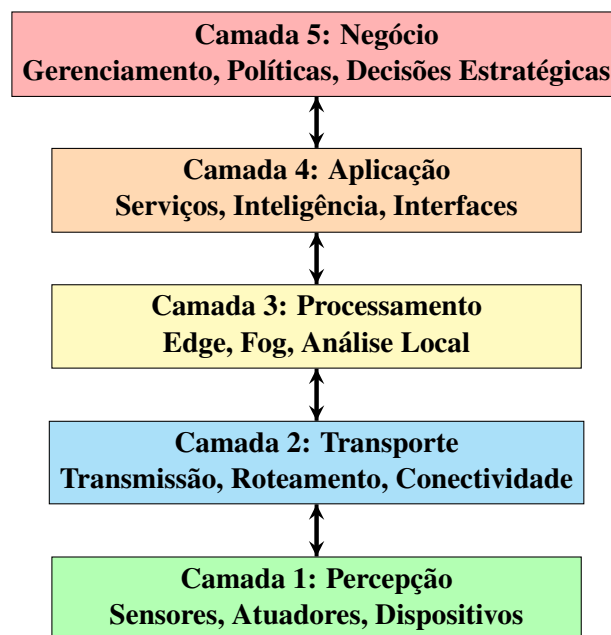


Figura 2 – Arquitetura em Cinco Camadas de Sistemas IoT

A figura 2 apresenta a estrutura hierárquica do modelo de cinco camadas, destacando as funções específicas de cada nível. Este modelo é mais adequado para analisar sistemas IoT complexos, especialmente aqueles que envolvem computação em borda e exigem uma governança mais robusta, como é o caso das cidades inteligentes. Ele permite uma compreensão mais detalhada dos desafios técnicos e institucionais envolvidos na implementação de soluções IoT em ambientes urbanos.

2.1.3 Tecnologias e Protocolos de IoT

O sucesso de qualquer solução IoT depende fundamentalmente da escolha adequada de tecnologias e protocolos de comunicação que atendam aos requisitos específicos da aplicação. Esses protocolos e tecnologias devem ser selecionados com base em critérios como consumo de energia, largura de banda, latência, alcance e segurança, considerando as características dos dispositivos envolvidos e o ambiente de implantação (WHAI DUZZAMAN *et al.*, 2022).

2.1.3.1 Protocolos de Comunicação

Os protocolos de comunicação no contexto IoT podem ser classificados em diferentes níveis da pilha de rede. Os principais protocolos de camada de aplicação utilizados em IoT incluem:

2.1.3.2 MQTT (Message Queuing Telemetry Transport)

MQTT é um protocolo de publicação/subscrição extremamente leve, projetado especificamente para aplicações IoT com largura de banda limitada e conexões instáveis (WHAI DUZZAMAN *et al.*, 2022). O protocolo opera por meio de um modelo de publicador/subscritor, que são dispositivos que enviam mensagens (publicadores) e dispositivos que recebem mensagens (subscritores), utilizando um servidor central denominado *broker*. Apresenta overhead mínimo, com apenas 2 bytes de cabeçalho fixo, e suporta três níveis de qualidade de serviço (QoS): no máximo uma vez, pelo menos uma vez e exatamente uma vez. Além disso, possui baixo consumo de energia, sendo ideal para dispositivos alimentados por bateria, e utiliza TCP na camada de transporte. É amplamente empregado em aplicações como automação residencial, monitoramento ambiental e indústria 4.0.

2.1.3.3 CoAP (*Constrained Application Protocol*)

CoAP é um protocolo da camada de aplicação otimizado para dispositivos com recursos muito limitados (WHAIDUZZAMAN *et al.*, 2022). Diferentemente do MQTT, que utiliza TCP, o CoAP opera sobre UDP, o que contribui para sua maior eficiência em cenários restritos. Ele apresenta tamanho de mensagem reduzido, com apenas 4 bytes de cabeçalho, e consumo energético ainda menor que o MQTT. Sua arquitetura segue o modelo cliente-servidor, com suporte a multicast e implementação de cache integrada. Além disso, é particularmente adequado para redes com latência previsível e confiável, oferecendo suporte à confirmação de entrega e ao mecanismo de piggyback para respostas.

2.1.3.4 HTTP/HTTPS

Embora não tenha sido projetado especificamente para IoT, o HTTP ainda é utilizado em algumas aplicações, principalmente em cenários com maior disponibilidade de recursos. Trata-se de um protocolo amplamente conhecido, com ferramentas maduras de desenvolvimento e suporte consolidado à segurança por meio de HTTPS/TLS. No entanto, apresenta maior overhead em comparação com protocolos como MQTT e CoAP, além de ser menos eficiente em termos energéticos para dispositivos com bateria limitada. Dessa forma, é mais apropriado para uso em gateways IoT e em integrações com sistemas legados.

2.1.4 *Tecnologias de Conectividade*

A camada física e de enlace de dados determina como os dispositivos se comunicam através do meio de transmissão. As principais tecnologias utilizadas em IoT incluem:

2.1.4.1 *Wi-Fi*

O Wi-Fi é uma tecnologia ubíqua de conectividade wireless, com raio de alcance de até 100 metros em ambiente aberto. Apresenta alta taxa de transmissão de dados, podendo atingir até 2,4 Gbps em sua versão Wi-Fi 6, além de possuir maior alcance em comparação ao Bluetooth. No entanto, seu consumo energético varia de moderado a alto. Conta com infraestrutura amplamente estabelecida em ambientes internos e é suportado por dispositivos IoT mais robustos. Essa tecnologia segue o padrão IEEE 802.11.

2.1.4.2 *Bluetooth e Bluetooth Low Energy (BLE)*

O Bluetooth é uma tecnologia de curto alcance projetada para comunicação pessoal entre dispositivos, com alcance típico variando entre 10 e 100 metros, dependendo da versão. A variante Bluetooth Low Energy (BLE), presente em versões mais recentes como o Bluetooth 5.0, reduz significativamente o consumo energético, tornando-a ideal para dispositivos como wearables, rastreadores e outros acessórios de curto alcance. Além disso, suporta redes do tipo mesh em versões mais atuais e segue o padrão IEEE 802.15.1, atualmente mantido pelo Bluetooth Special Interest Group. Destaca-se ainda por sua eficiência em aplicações que requerem emparelhamento automático entre dispositivos.

2.1.4.3 *LoRaWAN (Long Range Wide Area Network)*

LoRaWAN é uma tecnologia de longo alcance e baixa potência, ideal para redes geograficamente dispersas (SORNIN *et al.*, 2015). Apresenta alcance de até 15 km em áreas abertas e cerca de 5 km em ambientes urbanos, com consumo energético extremamente reduzido, permitindo a operação por anos com uma única bateria. Em contrapartida, possui baixa taxa de transmissão, variando entre 11 kbps e 50 kbps. Não requer infraestrutura proprietária, pois utiliza espectro de frequência livre (ISM), sendo amplamente empregada em aplicações de sensoriamento distribuído em larga escala. Utiliza modulação do tipo chirp de espalhamento espectral e adota uma arquitetura em estrela, na qual gateways se conectam a servidores na nuvem.

2.1.4.4 *5G*

A quinta geração de redes móveis (5G) promove capacidades revolucionárias para aplicações de IoT (AHMED *et al.*, 2024). Essa tecnologia oferece taxas de transmissão muito elevadas, podendo atingir até 10 Gbps, além de latência extremamente reduzida, chegando a aproximadamente 1 ms. Também possibilita o suporte a um grande número de dispositivos conectados simultaneamente, na ordem de bilhões. Inclui tecnologias como URLLC (comunicação ultra-confiável e de baixa latência) e eMBB (banda larga móvel aprimorada), sendo especialmente adequada para aplicações exigentes, como veículos autônomos e cirurgias remotas. Apesar dessas vantagens, o consumo energético ainda representa um desafio a ser otimizado, e sua implantação encontra-se em andamento em escala global.

2.1.5 IPv6 e Endereçamento

A transição para o IPv6 é essencial para acomodar a crescente quantidade de dispositivos IoT conectados (HINDEN; DEERING, 2011). Enquanto o IPv4 dispõe de aproximadamente $2^{32} \approx 4,3 \times 10^9$ endereços, número insuficiente para atender à demanda atual, o IPv6 oferece cerca de $2^{128} \approx 3,4 \times 10^{38}$ endereços, praticamente ilimitados. Além disso, o IPv6 suporta auto-configuração de endereços, apresenta melhor suporte à segurança por meio do IPsec integrado e permite fragmentação mais eficiente. Tecnologias como o 6LoWPAN viabilizam o uso de IPv6 em redes de baixa potência, como o Zigbee, sendo fundamental para garantir a interoperabilidade e a escalabilidade de longo prazo em ecossistemas IoT.

2.2 Cidades Inteligentes

Uma cidade inteligente, é um ambiente urbano que utiliza tecnologias digitais e sistemas conectados para otimizar a gestão dos recursos, melhorar a qualidade de vida dos cidadãos e promover o desenvolvimento sustentável (ABDALA *et al.*, 2014). Esse conceito baseia-se na integração entre infraestrutura física e tecnologias de informação e comunicação (TIC), especialmente a Internet das Coisas (IoT), que permite que dispositivos, sensores e serviços troquem dados em tempo real (SANTOS *et al.*, 2016). Por meio dessa conectividade, é possível monitorar o tráfego, o consumo de energia, o saneamento, a segurança pública e outros aspectos essenciais da vida urbana, permitindo tomadas de decisão mais rápidas e baseadas em dados. Assim, as cidades inteligentes não se limitam à adoção de tecnologia, mas envolvem também uma governança participativa e eficiente, com foco em sustentabilidade, inclusão social e eficiência operacional, tornando o espaço urbano mais resiliente, acessível e conectado às necessidades de seus habitantes.

No recorte conceitual deste TCC, cidade inteligente é tratada prioritariamente como um modelo de **gestão urbana orientada a serviços públicos e governança baseada em dados**, no qual a tecnologia atua como meio para ampliar a eficiência operacional, sustentabilidade e capacidade de resposta do poder público. Assim, o foco analítico não está apenas na sofisticação técnica das soluções, mas em sua contribuição prática para mobilidade, energia, segurança, saúde e inclusão territorial, considerando a viabilidade institucional e socioeconômica do contexto brasileiro (CARAGLIU *et al.*, 2013; MEIJER; BOLÍVAR, 2016; Ministério do Desenvolvimento Regional / ONU-Habitat, 2020).

O conceito de cidade inteligente surgiu gradualmente a partir da convergência entre tecnologia, urbanismo e gestão pública (CARAGLIU *et al.*, 2013). Ainda na década de 1990, o conceito começou a aparecer na literatura acadêmica e em projetos pioneiros, como a “Cidade Digital de Amsterdã” (De Digitale Stad), lançada em 1994, que utilizava a internet para aproximar governo e cidadãos, promovendo comunicação e acesso à informação (BARRETO; SOUZA, 2016). No Brasil, a discussão ganhou força a partir de 2013, com o Programa Cidades Sustentáveis (Programa Cidades Sustentáveis, 2020), e foi institucionalizada em 2020 com a Carta Brasileira para Cidades Inteligentes (Ministério do Desenvolvimento Regional / ONU-Habitat, 2020), resultado de uma parceria entre o Ministério do Desenvolvimento Regional e o ONU-Habitat, que estabeleceu diretrizes para o desenvolvimento urbano inteligente e inclusivo no país.

2.2.1 Relação entre IoT e Cidades Inteligentes

A relação entre Internet das Coisas (IoT) e cidades inteligentes é intrínseca e fundamental para a construção de ambientes urbanos mais eficientes, sustentáveis e conectados. A IoT atua como a infraestrutura tecnológica que possibilita a coleta, transmissão e análise de dados em tempo real, permitindo que as cidades inteligentes monitorem e gerenciem seus recursos de forma mais eficaz (ZANELLA *et al.*, 2014). Por meio de sensores, dispositivos conectados e sistemas inteligentes, a IoT permite que as cidades inteligentes otimizem serviços públicos, como transporte, energia, segurança e saúde, melhorando a qualidade de vida dos cidadãos (OLIVEIRA *et al.*, 2021). A integração entre IoT e cidades inteligentes é essencial para a implementação de soluções inovadoras que respondam às demandas urbanas contemporâneas, promovendo um desenvolvimento urbano mais sustentável e inclusivo (CARAGLIU *et al.*, 2013).

2.2.2 Arquitetura de uma Cidade Inteligente

A arquitetura de uma cidade inteligente é construída sobre uma estrutura em camadas que integra diversos componentes tecnológicos e institucionais para viabilizar a gestão urbana eficiente e orientada a dados. Essa arquitetura pode ser compreendida como um sistema complexo, no qual cada camada desempenha um papel específico na coleta, transmissão, processamento e aplicação de informações para otimizar os serviços públicos e a qualidade de vida dos cidadãos (CARAGLIU *et al.*, 2013; ZANELLA *et al.*, 2014). Aqui, destacam-se as seguintes camadas principais:

- **Camada física (sensores, dispositivos)** A camada física é composta por sensores, atuadores e dispositivos conectados que coletam dados do ambiente urbano. Esses dispositivos podem incluir câmeras de segurança, sensores de tráfego, medidores de energia, entre outros, que monitoram diversos aspectos da cidade em tempo real (ZANELLA *et al.*, 2014).
- **Camada de comunicação (redes)** A camada de comunicação é responsável por transmitir os dados coletados pelos dispositivos para os sistemas de processamento e análise. Essa camada utiliza diversas tecnologias de conectividade, como Wi-Fi, Bluetooth, LoRaWAN e 5G, para garantir a transmissão eficiente e segura dos dados (WHAIDUZZAMAN *et al.*, 2022).
- **Camada de processamento (cloud/edge)** A camada de processamento é responsável por armazenar e analisar os dados coletados. Isso pode ser feito em ambientes de nuvem ou no edge, próximo aos dispositivos, para reduzir a latência e melhorar a eficiência (YANNUZZI *et al.*, 2017).
- **Camada de aplicação (serviços)** A camada de aplicação é onde os serviços e aplicações são desenvolvidos e implementados, utilizando os insights gerados pelos sistemas de processamento para otimizar a gestão urbana e melhorar a qualidade de vida dos cidadãos (CARAGLIU *et al.*, 2013).

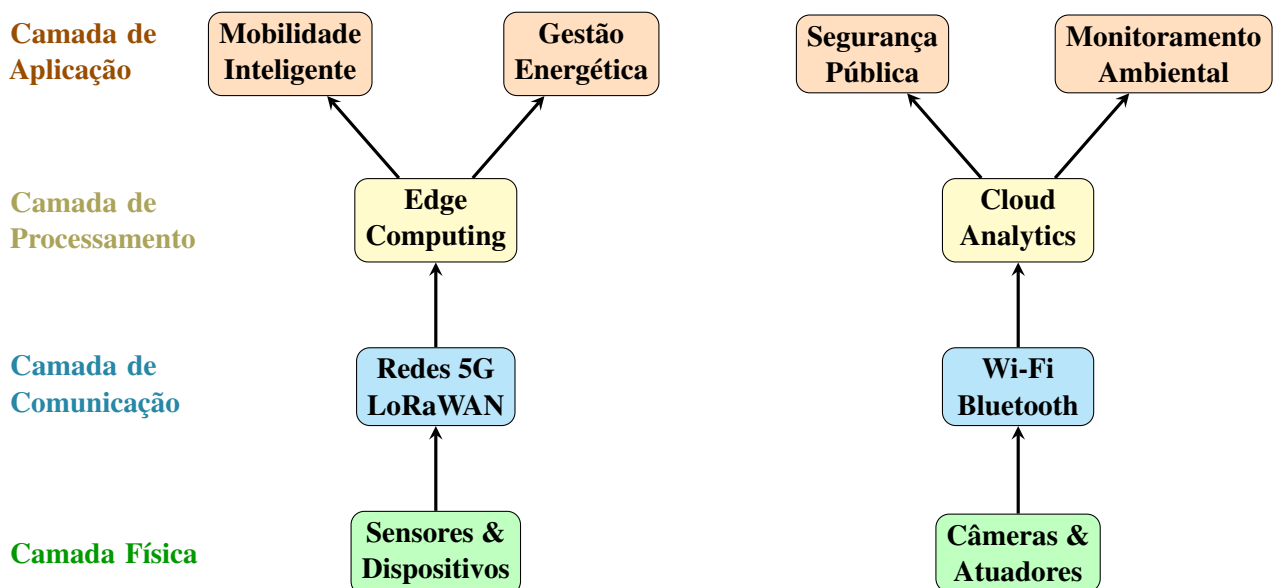


Figura 3 – Arquitetura em Camadas de uma Cidade Inteligente com Fluxo de Dados

A figura 3 apresenta a arquitetura em camadas de uma cidade inteligente, onde cada camada desempenha um papel específico no fluxo de dados. A **Camada Física** (verde) coleta

dados através de sensores e câmeras. A **Camada de Comunicação** (ciano) transmite esses dados utilizando redes como 5G, LoRaWAN, Wi-Fi e Bluetooth. A **Camada de Processamento** (amarelo) analisa os dados através de edge computing (próximo aos dispositivos) e cloud analytics (processamento centralizado). Por fim, a **Camada de Aplicações** (laranja) transforma os insights em serviços práticos como mobilidade inteligente, gestão energética, segurança pública e monitoramento ambiental. Os fluxos verticais representam a progressão de dados através das camadas, enquanto os fluxos horizontais indicam a integração entre diferentes serviços urbanos.

2.2.3 Principais Aplicações

As aplicações de IoT em cidades inteligentes são diversas e abrangem múltiplos setores, contribuindo para a melhoria da eficiência operacional, sustentabilidade e qualidade de vida urbana (KON; SANTANA, 2016). Na mobilidade inteligente, a IoT é utilizada para monitorar o tráfego, otimizar rotas de transporte público e gerenciar frotas de veículos compartilhados. Na iluminação pública, sensores conectados permitem ajustar a intensidade da luz com base na presença de pedestres ou veículos, promovendo economia de energia. A gestão de resíduos é aprimorada por meio de sensores em lixeiras que indicam quando estão cheias, otimizando as rotas de coleta. O monitoramento ambiental é realizado com sensores que medem a qualidade do ar, níveis de ruído e condições climáticas. Na segurança pública, câmeras inteligentes e sensores de movimento auxiliam na detecção de atividades suspeitas e na resposta rápida a incidentes. Por fim, a saúde digital é promovida por dispositivos conectados que monitoram sinais vitais e facilitam o acesso a serviços remotos de saúde.

3 METODOLOGIA

A pesquisa será conduzida por meio de uma **revisão narrativa da literatura**, com abordagem qualitativa e exploratória, tendo como foco principal o estudo da Internet das Coisas (IoT) aplicada ao desenvolvimento de cidades inteligentes e a análise dos desafios relacionados à sua adoção.

3.1 Procedimentos de Busca Bibliográfica

Para a construção do corpus de pesquisa, serão consultadas diversas bases de dados acadêmicas, incluindo Google Acadêmico, IEEE Xplore, Scopus, ACM Digital Library e Web of Science, bem como outras fontes relevantes como dissertações, teses e relatórios técnicos. A consulta a múltiplas fontes permite uma compreensão mais rica e variada do estado da arte sobre IoT e cidades inteligentes.

Além das bases de dados eletrônicas, serão considerados: livros especializados, capítulos de livros, trabalhos de conferências internacionais, e publicações de organizações e institutos de pesquisa reconhecidos na área de Internet das Coisas e desenvolvimento urbano inteligente. Essa abordagem ampla possibilita capturar não apenas pesquisas recentes, mas também fundações teóricas e conceituais estabelecidas.

3.2 Estratégia de Seleção de Artigos

A seleção de artigos segue uma abordagem flexível e iterativa, baseada na relevância temática e na qualidade das contribuições. Serão utilizados descritores-chave em português e inglês, tais como: “cidades inteligentes”, “Internet das Coisas”, “IoT”, “smart cities”, “IoT em cidades inteligentes”, “desafios de IoT”, “aplicações de IoT”, “segurança em IoT”, “privacidade em cidades inteligentes”, “interoperabilidade”, e “computação de borda”.

A busca não se limita a uma estratégia rígida com operadores booleanos, permitindo que a exploração da literatura seja guiada pela identificação de trabalhos relevantes e pela análise de suas referências bibliográficas, possibilitando o descobrimento de materiais adicionais relacionados.

3.3 Critérios de Inclusão

Os critérios de inclusão para este estudo são:

- Publicações que abordem Internet das Coisas, cidades inteligentes, ou a interseção entre esses temas;
- Artigos científicos, dissertações, teses, capítulos de livros e relatórios técnicos que tragam contribuições relevantes ao tema;
- Publicações em português e inglês;
- Estudos que discutam conceitos fundamentais, avanços tecnológicos, aplicações práticas, desafios ou implicações de IoT em contextos urbanos;
- Trabalhos que ofereçam perspectivas teóricas, empíricas ou críticas sobre o desenvolvimento de cidades inteligentes.

3.4 Análise e Síntese dos Trabalhos

A análise dos trabalhos recuperados será realizada de forma qualitativa e exploratória, categorizando os estudos em torno de eixos temáticos principais que estruturam o estado da arte em IoT e cidades inteligentes. Os materiais serão examinados criticamente para identificar:

- **Avanços tecnológicos emergentes:** o papel das tecnologias como 5G, computação de borda (edge/fog computing), inteligência artificial embarcada (AIoT) e blockchain na transformação de cidades inteligentes, analisando como cada uma contribui para conectividade, processamento de dados e automação;
- **Arquiteturas e plataformas IoT:** os diferentes modelos arquiteturais (centralizado em nuvem, descentralizado em edge, híbrido) e suas implicações para desempenho, custo, escalabilidade e resiliência em ambientes urbanos;
- **Desafios técnicos:** questões de interoperabilidade entre sistemas heterogêneos, compatibilidade de protocolos, gerenciamento de infraestrutura em larga escala e confiabilidade de conexão;
- **Questões de segurança e privacidade:** mecanismos propostos para proteção de dados, autenticação em redes IoT, análise de vulnerabilidades específicas do ambiente urbano conectado e conformidade regulatória;
- **Desafios sociais, econômicos e políticos:** barreiras de adoção relacionadas a investimentos, governança digital, capacidade institucional, inclusão digital e adaptação do marco

regulatório;

A síntese dos resultados será apresentada de forma narrativa e integrada, estabelecendo conexões entre os eixos temáticos, identificando convergências e divergências entre diferentes autores e escolas de pensamento, e destacando as principais tendências e lacunas de pesquisa. Ênfase será dada ao modo como as inovações tecnológicas podem ser adaptadas e implementadas considerando as especificidades do contexto urbano contemporâneo, particularmente em cidades em desenvolvimento.

3.5 Objetivos e Contribuições Esperadas

A construção desta revisão narrativa tem como objetivo oferecer uma visão abrangente e crítica sobre o estado da arte em Internet das Coisas aplicada a cidades inteligentes, destacando os avanços tecnológicos mais relevantes e os desafios emergentes que podem limitar a adoção dessas soluções em ambientes urbanos. Por meio desta revisão narrativa, pretende-se:

- Mapear e compreender o estado atual do conhecimento sobre Internet das Coisas aplicada a cidades inteligentes;
- Identificar os principais avanços tecnológicos, aplicações práticas e inovações na área;
- Destacar os desafios centrais e as barreiras enfrentadas na implementação e adoção de tecnologias IoT em ambientes urbanos;
- Apresentar diferentes perspectivas e abordagens para lidar com problemas de segurança, privacidade, interoperabilidade e sustentabilidade;
- Contribuir com uma fundamentação teórica sólida para futuras pesquisas e desenvolvimentos na área;

4 AVANÇOS TECNOLÓGICOS

4.1 Infraestrutura de Comunicação

A infraestrutura de comunicação representa a base tecnológica sobre a qual se sustentam os ecossistemas IoT das cidades inteligentes (AKPAKWU *et al.*, 2017). Essa infraestrutura é composta por um conjunto diverso de tecnologias de conectividade, protocolos de comunicação e arquiteturas de rede que viabilizam a transmissão confiável, eficiente e segura de dados entre bilhões de dispositivos distribuídos em ambientes urbanos. A escolha adequada das tecnologias de comunicação é determinante para o desempenho, escalabilidade e viabilidade econômica das soluções IoT implementadas em cidades.

As tecnologias de comunicação para IoT podem ser categorizadas conforme seu alcance, consumo de energia, capacidade de transmissão de dados e latência (AKPAKWU *et al.*, 2017; WHAIDUZZAMAN *et al.*, 2022):

- **Redes Celulares 5G e 5G-Advanced:** representam a evolução das redes móveis tradicionais, oferecendo velocidades de transmissão significativamente superiores (até 20 Gbps), latência ultra-baixa (1 ms ou inferior) e suporte para conectividade massiva de dispositivos (até 1 milhão de dispositivos por quilômetro quadrado). Essas características as tornam ideais para aplicações críticas em tempo real, como controle de tráfego inteligente, resposta a emergências médicas e monitoramento de infraestrutura urbana (AKPAKWU *et al.*, 2017; ZAMAN *et al.*, 2024). A implementação de redes 5G já está em andamento em diversos contextos urbanos globais, com perspectivas de expansão para as versões posteriores (5G-Advanced e 6G);
- **Redes de Longa Distância com Baixo Consumo de Energia (LPWAN):** incluem tecnologias como LoRaWAN, Sigfox e NB-IoT (Narrowband IoT), que foram especificamente projetadas para conexões de longa distância com consumo mínimo de energia. Essas tecnologias são particularmente adequadas para dispositivos alimentados por baterias que necessitam permanecer conectados por longos períodos, como sensores de qualidade do ar, medidores de consumo de energia recuados ou dispositivos de rastreamento urbano. Embora ofereçam velocidades de transmissão mais reduzidas (entre 20 kbps e 250 kbps), sua eficiência energética e custo operacional reduzido as tornaram amplamente adotadas em aplicações IoT urbanas (AKPAKWU *et al.*, 2017; WHAIDUZZAMAN *et al.*, 2022);
- **Redes Locais de Curta Distância:** tecnologias como Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee e Z-Wave

proporcionam conectividade de alta capacidade em ambientes de cobertura mais limitada (centenas de metros a alguns quilômetros). Essas tecnologias são frequentemente utilizadas em ambientes internos, prédios inteligentes, residências conectadas e malhas de sensores localizadas, funcionando como complemento às redes de longa distância em arquiteturas multi-camada (ZANELLA *et al.*, 2014);

- **Redes Tradicionais de Internet:** a infraestrutura de banda larga fixa (fibra óptica, cabo e xDSL) continua sendo essencial para fornecer conectividade de alta capacidade aos hubs, centros de processamento de dados e pontos críticos de agregação de dados urbanos, servindo como backbone das arquiteturas IoT nas cidades (ZANELLA *et al.*, 2014; AKPAKWU *et al.*, 2017).

A convergência dessas múltiplas tecnologias de comunicação em uma única infraestrutura urbana cria um ambiente heterogêneo e complexo. Para gerenciar essa diversidade, as cidades inteligentes adotam arquiteturas de rede em camadas, nas quais diferentes tecnologias atuam de forma integrada: dispositivos IoT utilizam redes LPWAN ou locais para se conectar a gateways; esses gateways, por sua vez, utilizam redes 5G ou conexões de banda larga para transmitir dados aos centros de processamento; e a orquestração de toda essa comunicação é realizada através de plataformas de gerenciamento de conectividade e middlewares especializados (ZANELLA *et al.*, 2014; SINGH *et al.*, 2022).

A qualidade da infraestrutura de comunicação tem implicações diretas na capacidade de implementação de serviços urbanos avançados. Aplicações como transporte autônomo, monitoramento ambiental em tempo real, gestão inteligente de energia e serviços de saúde digital dependem de redes que ofereçam confiabilidade, disponibilidade e latência controlada. Além disso, a expansão e modernização contínua dessa infraestrutura é fundamental para garantir a inclusão digital de todas as regiões urbanas, reduzindo as desigualdades no acesso a tecnologias IoT.

4.2 Computação em Nuvem e Edge

A computação em nuvem e computação em borda (edge computing) constituem dois paradigmas complementares de processamento e armazenamento de dados que desempenham papéis críticos na arquitetura de sistemas IoT em cidades inteligentes (WHAIDUZZAMAN *et al.*, 2022; YANNUZZI *et al.*, 2017; STERGIOU *et al.*, 2018). Enquanto a computação em nuvem centraliza o processamento em data centers remotos, oferecendo escalabilidade e poder

computacional significativo, a computação em borda aproxima o processamento das fontes de dados, reduzindo latência e consumo de largura de banda, resultando na criação de um continuum computacional distribuído.

Em termos urbanos, essa combinação importa porque diferentes serviços exigem diferentes níveis de tempo de resposta, disponibilidade e proteção de dados. Aplicações como controle semafórico adaptativo, monitoramento de incidentes e resposta a emergências demandam processamento local com baixa latência, enquanto planejamento de longo prazo, integração intersetorial e análise histórica em larga escala dependem da elasticidade da nuvem. A arquitetura híbrida com camadas de névoa permite equilibrar custo operacional, continuidade de serviço em cenários de falha de conectividade e maior privacidade por processamento local de dados sensíveis (YANNUZZI *et al.*, 2017; STERGIOU *et al.*, 2018; LEITE, 2019).

4.2.1 Computação em Nuvem

A computação em nuvem oferece infraestrutura na qual recursos computacionais e de armazenamento são disponibilizados através da internet, permitindo que cidades inteligentes processem e armazenem volumes massivos de dados coletados por dispositivos IoT. Os principais benefícios da computação em nuvem para cidades inteligentes incluem:

- **Escalabilidade dinâmica:** os recursos computacionais podem ser expandidos ou contraídos conforme a demanda de processamento, permitindo que as cidades gerenciem picos de tráfego de dados sem necessidade de investimentos antecipados em infraestrutura local;
- **Armazenamento centralizado:** dados coletados de setores críticos como mobilidade, energia, saúde e meio ambiente podem ser armazenados consolidadamente, facilitando análises integradas e correlações entre diferentes fontes de informação;
- **Capacidade analítica avançada:** plataformas em nuvem oferecem ferramentas sofisticadas para análise de dados, aprendizado de máquina e inteligência artificial, permitindo extração de insights valiosos a partir de big data urbano;
- **Acesso remoto e integração:** múltiplas instituições (órgãos públicos, operadores de serviços, pesquisadores) podem acessar dados e aplicações através da nuvem, promovendo governança colaborativa e participativa nas cidades (ZAMAN *et al.*, 2024; SINGH *et al.*, 2022; STERGIOU *et al.*, 2018).

Porém, a dependência de computação centralizada em nuvem apresenta limitações significativas para aplicações críticas em tempo real. A latência inerente à transmissão de dados

para centros remotos, a potencial indisponibilidade de conexão com a internet e as questões de privacidade relacionadas ao envio de dados sensíveis para terceiros criaram a necessidade de complementar a nuvem com processamento local (STERGIOU *et al.*, 2018; LEITE, 2019).

4.2.2 *Computação em Borda (Edge Computing)*

A computação em borda emerge como um paradigma que complementa a abordagem centralizada da nuvem, deslocando a capacidade de processamento para os limites da rede, mais próximos aos dispositivos geradores de dados (SHI *et al.*, 2016). Em cidades inteligentes, a computação em borda permite:

- **Redução de latência:** ao processar dados localmente, dispositivos edge eliminam a latência de transmissão para a nuvem, viabilizando aplicações críticas que exigem respostas em tempo real, como controle de tráfego adaptativo, detecção de emergências e resposta a incidentes urbanos (YANNUZZI *et al.*, 2017);
- **Otimização de largura de banda:** apenas dados processados, resumidos ou inovadores precisam ser transmitidos para a nuvem, reduzindo significativamente o consumo de largura de banda e os custos operacionais de comunicação;
- **Resiliência e autonomia:** arquiteturas edge permitem que sistemas urbanos funcionem de forma autônoma mesmo com conexões intermitentes ou falhas de rede, garantindo continuidade de serviços críticos;
- **Privacidade e segurança:** dados sensíveis de cidadãos podem ser processados localmente sem necessidade de transmissão para a nuvem, minimizando riscos de exposição e violações de privacidade (LEITE, 2019; STERGIOU *et al.*, 2018).

4.2.3 *Arquitetura Híbrida: Fog Computing*

Reconhecendo os benefícios complementares de nuvem e borda, o paradigma de computação em névoa (fog computing) propõe uma arquitetura estratificada que distribui o processamento em múltiplos níveis: dispositivos finais (sensores e atuadores), nós edge (gateways e roteadores inteligentes), serviços fog (data centers descentralizados em nível de bairro ou região urbana) e nuvem centralizada. Essa abordagem multi-camada permite otimizar trade-offs entre latência, largura de banda, custo e segurança (VAQUERO; RODERO-MERINO, 2014; YANNUZZI *et al.*, 2017).

Em uma arquitetura típica de cidade inteligente com fog computing:

1. Dispositivos IoT coletam dados em tempo real (sensores de tráfego, qualidade do ar, consumo energético, etc.);
2. Nós edge próximos aos dispositivos realizam filtragem, agregação e processamento imediato de dados, gerando respostas locais quando necessário;
3. Servidores fog em nível de bairro/região consolidam dados de múltiplos nós edge, realizando correlações e análises mais complexas;
4. A nuvem centralizada armazena dados históricos de longo prazo, realiza análises preditivas avançadas e suporta tomadas de decisão estratégicas;
5. Realimentação de insights da nuvem para os níveis inferiores permite que políticas de otimização urbana sejam continuamente refinadas.

4.2.4 Desafios e Oportunidades

A adoção de computação em nuvem e edge em cidades inteligentes enfrenta desafios significativos de orquestração, heterogeneidade de dispositivos, garantia de qualidade de experiência (QoE) e segurança distribuída (FIZZA *et al.*, 2021; SINGH *et al.*, 2022; STERGIOU *et al.*, 2018). As oportunidades, contudo, são vastas: ao viabilizar processamento eficiente de grandes volumes de dados urbanos, essas tecnologias abrem possibilidades para serviços inteligentes que melhoram mobilidade, sustentabilidade, segurança pública e qualidade de vida dos cidadãos.

4.3 Inteligência Artificial

A Inteligência Artificial (IA) tem se consolidado como elemento estratégico na evolução da Internet das Coisas (IoT) em cidades inteligentes, ao transformar grandes volumes de dados urbanos em decisões operacionais e conhecimento preditivo (ZAMAN *et al.*, 2024; WHAIDUZZAMAN *et al.*, 2022; SINGH *et al.*, 2022). Em vez de atuar apenas como tecnologia de apoio analítico, a IA passa a compor o núcleo de sistemas urbanos adaptativos, capazes de interpretar padrões complexos, antecipar eventos críticos e otimizar recursos públicos de forma contínua.

No contexto urbano, a integração entre IA e IoT (frequentemente denominada AIoT) permite que sensores, câmeras, medidores inteligentes e dispositivos conectados não apenas coletem dados, mas alimentem modelos capazes de aprendizagem e inferência em tempo real (FORKAN *et al.*, 2024; MARTINS *et al.*, 2025). Esse avanço amplia a capacidade de resposta

dos serviços públicos e contribui para decisões mais rápidas, precisas e orientadas por evidências.

4.3.1 Principais abordagens de IA aplicadas às cidades inteligentes

As aplicações contemporâneas de IA em ambientes urbanos envolvem diferentes abordagens computacionais, com destaque para:

- **Aprendizado de Máquina (Machine Learning):** utilizado para modelagem de séries temporais e classificação de padrões urbanos, como previsão de demanda de transporte, estimativa de consumo energético e identificação de comportamentos anômalos em redes de serviços;
- **Aprendizado Profundo (Deep Learning):** empregado em cenários com grandes volumes de dados não estruturados, especialmente imagens e vídeo, viabilizando reconhecimento de eventos em vias públicas, detecção de congestionamentos e monitoramento de infraestrutura crítica;
- **Visão Computacional:** aplicada ao processamento de imagens de câmeras urbanas para suporte à mobilidade, segurança pública e gestão de riscos, com potencial para identificação automática de incidentes e priorização de respostas;
- **Análise Preditiva e Prescritiva:** direcionada à antecipação de cenários urbanos (ex.: picos de tráfego, falhas em equipamentos, sobrecarga em serviços), permitindo não apenas prever eventos, mas recomendar ações de mitigação (SINGH *et al.*, 2022; ZAMAN *et al.*, 2024).

4.3.2 Aplicações estratégicas da IA em serviços urbanos

Entre os principais usos da IA em cidades inteligentes, destacam-se:

1. **Mobilidade urbana inteligente:** algoritmos de IA otimizam semáforos, ajustam rotas de transporte coletivo e detectam padrões de congestionamento, contribuindo para redução de tempo de deslocamento e emissões;
2. **Gestão energética:** modelos inteligentes estimam demanda em tempo real, identificam desperdícios e apoiam estratégias de eficiência energética em prédios públicos e redes de distribuição;
3. **Saúde e resposta a emergências:** sistemas baseados em IA auxiliam a priorização de atendimentos, previsão de surtos e alocação de recursos críticos, elevando a eficiência operacional dos serviços;

4. **Manutenção preditiva de infraestrutura:** sensores acoplados a modelos de IA permitem identificar sinais precoces de degradação em vias, iluminação e ativos urbanos, reduzindo custos de manutenção corretiva;
5. **Monitoramento ambiental:** análises inteligentes de dados de qualidade do ar, ruído e clima apoiam políticas públicas de sustentabilidade e medidas de prevenção em áreas vulneráveis (FORKAN *et al.*, 2024; ZANELLA *et al.*, 2014).

4.3.3 *Desafios técnicos e de governança*

Apesar do elevado potencial, a adoção de IA em cidades inteligentes enfrenta desafios relevantes. Do ponto de vista técnico, destacam-se qualidade e heterogeneidade dos dados, necessidade de interoperabilidade entre plataformas e custo computacional para treinamento e atualização de modelos. Em termos institucionais, emergem preocupações com transparência algorítmica, vieses decisórios, responsabilidade sobre decisões automatizadas e proteção de dados dos cidadãos (SINGH *et al.*, 2022; KIMANI *et al.*, 2019; LEITE, 2019).

Nesse cenário, a literatura aponta que estratégias de IA para cidades inteligentes devem combinar desempenho técnico com princípios de ética, auditabilidade e governança digital (JOBIN *et al.*, 2019; MEIJER; BOLÍVAR, 2016). Assim, a consolidação da IA no ambiente urbano depende não apenas da sofisticação dos modelos, mas também de marcos regulatórios e políticas públicas que garantam uso responsável, inclusivo e socialmente legítimo dessas tecnologias.

4.4 **Mapeamento de Tecnologias para Aplicações Urbanas**

A consolidação de cidades inteligentes depende da adequação entre tecnologias disponíveis e demandas específicas de aplicações urbanas. A Tabela 1 apresenta um mapeamento integrado das principais tecnologias (5G, LPWAN, Edge/Fog Computing, Inteligência Artificial Embarcada) em relação aos domínios de aplicação urbana, destacando como cada tecnologia contribui para viabilizar diferentes serviços e garantir atributos críticos de desempenho.

Essa visão integrada permite compreender que a escolha e combinação de tecnologias para cidades inteligentes deve ser orientada por uma análise cuidadosa das necessidades específicas de cada aplicação, considerando trade-offs entre desempenho, custo, segurança e sustentabilidade. A adoção estratégica dessas tecnologias é fundamental para transformar o

Tabela 1 – Mapeamento de tecnologias IoT para aplicações urbanas e atributos críticos

Tecnologia	Aplicações Urbanas Principais	Vantagem e Desafio Chave
5G/5G-Advanced	Tráfego inteligente, resposta de emergências, vigilância em tempo real, veículos autônomos	<i>Vantagem:</i> Velocidade e confiabilidade; <i>Desafio:</i> Custo de infraestrutura
LPWAN (LoRaWAN, NB-IoT, Sigfox)	Sensores de qualidade do ar, leitura inteligente de medidores, monitoramento de iluminação	<i>Vantagem:</i> Custo e energia reduzidos; <i>Desafio:</i> Baixa taxa de transmissão
Edge/Fog Computing	Controle de tráfego em tempo real, detecção de anomalias, resposta a incidentes	<i>Vantagem:</i> Resiliência e privacidade; <i>Desafio:</i> Orquestração distribuída
AIoT (IA Embarcada)	Reconhecimento de padrões, manutenção preditiva, visão computacional, otimização de energia	<i>Vantagem:</i> Insights em tempo real; <i>Desafio:</i> Custo computacional do treinamento

Fonte: Elaborado pelo autor

potencial da IoT em benefícios concretos para a população urbana.

4.5 Integração de Sistemas

A integração de sistemas é um eixo central para a consolidação das cidades inteligentes, pois conecta dispositivos IoT, plataformas digitais, bases de dados setoriais e serviços públicos em um ecossistema operacional unificado (ZANELLA *et al.*, 2014; SINGH *et al.*, 2022). Sem integração adequada, iniciativas tecnológicas tendem a operar em silos, reduzindo o potencial de geração de valor público, dificultando a coordenação interinstitucional e comprometendo a escalabilidade das soluções urbanas.

No contexto urbano, integrar sistemas significa viabilizar interoperabilidade técnica, semântica e organizacional entre diferentes domínios, como mobilidade, energia, saneamento, segurança pública, saúde e meio ambiente. Essa interoperabilidade depende da adoção de padrões de comunicação, modelos de dados consistentes e mecanismos de orquestração capazes de operar em ambientes heterogêneos e distribuídos (WHAIDUZZAMAN *et al.*, 2022; CARR *et al.*, 2023).

4.5.1 Dimensões da integração em cidades inteligentes

A integração de sistemas em cidades inteligentes pode ser entendida em quatro dimensões complementares. Em termos práticos, essas dimensões explicam *como* os dados circulam, *quem* utiliza as informações e *onde* o processamento acontece para sustentar decisões urbanas mais rápidas e coordenadas.

- **Integração vertical:** organiza o fluxo de dados do nível operacional ao estratégico. Na prática, um dado coletado por um sensor em via pública pode ser processado, exibido em um painel de controle e, em seguida, apoiar decisões de gestão em nível municipal;
- **Integração horizontal:** conecta diferentes órgãos e serviços (por exemplo, mobilidade, segurança e saúde), reduzindo atuação isolada e permitindo respostas coordenadas para problemas urbanos complexos;
- **Integração temporal:** combina análise em tempo real (resposta imediata) com análise histórica (planejamento). Isso permite agir no presente e, ao mesmo tempo, aprimorar políticas públicas com base em padrões observados ao longo do tempo;
- **Integração entre borda, névoa e nuvem:** distribui tarefas de processamento conforme requisitos de latência, custo, segurança e disponibilidade. Operações críticas podem ser tratadas localmente (borda/névoa), enquanto a nuvem concentra análises amplas e armazenamento de longo prazo (YANNUZZI *et al.*, 2017; VAQUERO; RODERO-MERINO, 2014).

Quando essas quatro dimensões são implementadas de forma conjunta, a cidade ganha maior capacidade de coordenação entre setores, uso mais eficiente de recursos e maior qualidade na prestação de serviços ao cidadão.

4.5.2 *Padrões, dados e plataformas de interoperabilidade*

Para que a integração entre sistemas urbanos funcione de forma confiável, não basta conectar tecnologias; é necessário que os sistemas “falem a mesma língua”. Isso exige padronização de interfaces, organização consistente dos dados e uma plataforma capaz de coordenar fluxos entre diferentes órgãos e serviços (CARR *et al.*, 2023; SINGH *et al.*, 2022).

Na prática, essa interoperabilidade depende de três elementos técnicos centrais:

- **Padrões de comunicação e integração:** uso de APIs, barramentos de mensagens e middlewares para conectar sistemas legados e novas aplicações IoT sem criar dependência excessiva de fornecedor;
- **Padronização de dados e semântica:** definição de modelos de dados, metadados e regras de qualidade para evitar interpretações ambíguas e permitir compartilhamento consistente entre secretarias e plataformas;
- **Plataformas de interoperabilidade:** ambientes que orquestram coleta, transformação, armazenamento e distribuição de dados, com mecanismos de monitoramento e controle

operacional.

Além da camada técnica, essas plataformas precisam incorporar governança de dados, controle de acesso, rastreabilidade e auditoria. Sem esses mecanismos, aumentam os riscos de inconsistência, duplicidade de registros e decisões conflitantes entre órgãos públicos, comprometendo a efetividade das políticas urbanas baseadas em dados (ZAMAN *et al.*, 2024).

5 DESAFIOS EMERGENTES

Os desafios emergentes para a adoção de IoT em cidades inteligentes são multifacetados, abrangendo aspectos técnicos, sociais, econômicos e políticos. A seguir, serão discutidos os principais desafios relacionados à segurança, privacidade, interoperabilidade e sustentabilidade, que representam barreiras significativas para a implementação efetiva de soluções IoT em ambientes urbanos.

5.1 Segurança

A segurança é um dos pilares críticos para a viabilidade de cidades inteligentes, pois a interconexão massiva de dispositivos IoT, sistemas de controle urbano e bases de dados sensíveis amplia significativamente a superfície de ataque cibernético. Em ambientes urbanos conectados, ameaças podem provocar desde indisponibilidade de serviços essenciais até comprometimento da integridade de infraestruturas críticas, como redes de energia, transporte e saneamento (KIMANI *et al.*, 2019; LEITE, 2019).

Os desafios de segurança em cidades inteligentes são multifacetados e interdependentes. Entre os principais, destacam-se:

- **Vulnerabilidades em endpoints.** A grande quantidade de dispositivos heterogêneos, frequentemente com firmware desatualizado, autenticação fraca e configurações inseguras, favorece a formação de botnets, o sequestro de dispositivos e a indisponibilidade de serviços urbanos conectados. Como mitigação, destacam-se a adoção de segurança por design, políticas contínuas de atualização, hardening de dispositivos e mecanismos de autenticação forte (KIMANI *et al.*, 2019; LEITE, 2019).
- **Segmentação de redes insuficiente.** A integração de sensores, gateways e serviços em arquiteturas multicamadas sem isolamento lógico adequado facilita a movimentação lateral de ataques e o comprometimento em cascata de sistemas críticos. Para mitigar esses riscos, a literatura recomenda a segmentação por zonas, o uso do princípio do privilégio mínimo e a adoção de estratégias de defesa em profundidade (STERGIOU *et al.*, 2018).
- **Proteção de dados em trânsito.** A comunicação contínua entre camadas de borda, névoa e nuvem, quando realizada sem mecanismos robustos de confidencialidade e integridade, pode resultar em vazamento e adulteração de dados, comprometendo a confiabilidade de decisões automatizadas em áreas como mobilidade, segurança e gestão urbana. Como

medidas de mitigação, destacam-se a criptografia ponta a ponta, a validação de integridade, a gestão adequada de chaves e o monitoramento de tráfego (LEITE, 2019; STERGIOU *et al.*, 2018).

- **Baixa resiliência a ataques sofisticados.** A baixa maturidade em monitoramento contínuo e na resposta coordenada a incidentes em ecossistemas distribuídos pode levar a interrupções prolongadas em serviços essenciais e ao aumento do risco operacional das cidades. Nesse contexto, a literatura sugere a adoção de detecção comportamental contínua, planos de resposta e recuperação testados periodicamente, além de capacitação técnica e governança de incidentes (LEITE, 2019; KIMANI *et al.*, 2019).

A literatura indica que estratégias efetivas de segurança para cidades inteligentes devem combinar governança técnica, capacidade de resposta e práticas preventivas permanentes. Sem esses elementos, os benefícios da integração urbana podem ser rapidamente neutralizados por incidentes cibernéticos de escala.

5.2 Privacidade

A coleta massiva de dados em cidades inteligentes — desde localização e padrões de movimento até hábitos de consumo e saúde — levanta questões fundamentais sobre privacidade de cidadãos e proteção de informações pessoais. Em contextos urbanos onde sensores, câmeras e aplicativos rastreiam constantemente a vida pública, o risco de vigilância em massa e abuso de dados é substancial (LEITE, 2019; SINGH *et al.*, 2022).

Entre os desafios críticos de privacidade estão:

- **Consentimento informado e transparência:** em muitos projetos, cidadãos não compreendem claramente quais dados são coletados, por quanto tempo permanecem armazenados e quais instituições os utilizam. Na prática, isso reduz confiança pública e dificulta o exercício efetivo de direitos sobre dados pessoais. A literatura recomenda políticas de privacidade legíveis, comunicação ativa com a população e mecanismos de consentimento granular ao longo do ciclo de vida dos dados.
- **Conformidade regulatória:** a aplicação da LGPD em ambientes urbanos conectados exige revisão de processos, definição de bases legais e rastreabilidade das operações de tratamento. Sem essa estrutura, surgem riscos jurídicos e custos corretivos elevados em fases avançadas de implantação. Como resposta, os estudos sugerem incorporar privacidade por design, governança de dados e auditorias periódicas de conformidade

(Brasil, 2018; LEITE, 2019).

- **Risco de reidentificação:** mesmo quando dados são anonimizados, cruzamentos entre bases distintas podem reconstruir perfis individuais e inferir comportamentos sensíveis. Esse problema afeta diretamente a segurança informacional e a legitimidade de políticas orientadas por dados. A literatura aponta anonimização robusta, minimização de coleta e controles rigorosos de acesso como medidas essenciais (ZAMAN *et al.*, 2024).
- **Compartilhamento interinstitucional:** o uso de dados por múltiplos órgãos e parceiros amplia a complexidade de controle, responsabilização e auditoria sobre uso final. Isso pode gerar assimetrias de acesso, uso indevido de informações e decisões pouco transparentes. Para mitigar esses riscos, recomendam-se acordos de governança, trilhas de auditoria e definição clara de papéis e responsabilidades (CARR *et al.*, 2023).

A consolidação de cidades inteligentes com privacidade requer não apenas conformidade legal, mas também design participativo de políticas de dados, transparência algorítmica e mecanismos de controle pelo cidadão sobre informações pessoais.

5.3 Escalabilidade

À medida que cidades expandem a implantação de sensores, sistemas IoT e plataformas analíticas, os volumes de dados crescem exponencialmente. Sistemas projetados para dezenas de sensores precisam lidar com milhões de dispositivos conectados, e infraestruturas locais necessitam evoluir para suportar essa magnitude sem degradação de performance (SINGH *et al.*, 2022; WHAIDUZZAMAN *et al.*, 2022).

Os principais desafios de escalabilidade incluem:

- **Capacidade de armazenamento e processamento:** o crescimento contínuo do volume de dados urbanos pressiona infraestruturas que não foram projetadas para fluxos massivos e contínuos. Na prática, gargalos de processamento atrasam análises e reduzem a utilidade operacional dos dados. A literatura indica arquiteturas distribuídas, processamento em tempo real e escalonamento progressivo como estratégias centrais.
- **Latência e desempenho de rede:** serviços críticos, como gestão de tráfego e resposta a emergências, exigem decisões em janelas de tempo muito curtas. Embora borda e névoa reduzam latência, surgem desafios de orquestração entre camadas e consistência entre dados locais e centrais. Os estudos recomendam arquitetura híbrida nuvem-borda, políticas de sincronização e monitoramento contínuo de desempenho (YANNUZZI *et al.*, 2017).

- **Sustentabilidade de custos:** levar soluções de pilotos para escala metropolitana demanda investimento contínuo em hardware, conectividade, operação e manutenção. Sem planejamento financeiro de médio prazo, a expansão tende a perder ritmo ou ser descontinuada. A literatura sugere implantação faseada, priorização por impacto e arranjos de financiamento cooperativo.
- **Heterogeneidade tecnológica:** a convivência entre dispositivos legados, novas plataformas e soluções proprietárias aumenta a complexidade de integração e atualização em larga escala. Isso eleva riscos de incompatibilidade e custos operacionais cumulativos. Como mitigação, recomenda-se padronização progressiva, camadas de interoperabilidade e governança técnica permanente (BENTO *et al.*, 2024; WHAIDUZZAMAN *et al.*, 2022).

A escalabilidade técnica e econômica permanece um fator limitante para transição de pilotos urbanos para implementação em escala metropolitana.

5.4 Interoperabilidade

Apesar da proliferação de soluções IoT e cidades inteligentes, persistem fragmentações tecnológicas severas. Fornecedores oferecem plataformas proprietárias, protocolos de comunicação incompatíveis e formatos de dados não padronizados, dificultando a integração entre sistemas independentes (CARR *et al.*, 2023; SINGH *et al.*, 2022).

Os desafios intrínsecos de interoperabilidade abrangem:

- **Fragmentação de padrões:** a coexistência de diferentes protocolos e tecnologias de conectividade torna a integração ponta a ponta mais complexa e menos previsível. Em termos práticos, projetos passam a depender de adaptações constantes e infraestrutura redundante. A literatura recomenda adoção gradual de padrões abertos e arquitetura orientada a interfaces.
- **Silos setoriais de dados:** bases mantidas por órgãos e concessionárias em estruturas isoladas dificultam análises transversais e respostas coordenadas para problemas urbanos complexos. Isso limita o potencial de decisões orientadas por evidência em tempo real. Como mitigação, os estudos apontam modelos de compartilhamento governado, padronização semântica e integração federada de dados (ZAMAN *et al.*, 2024; CARR *et al.*, 2023).
- **Dependência de fornecedores:** plataformas proprietárias tendem a restringir portabilidade e elevar o custo de migração ou evolução tecnológica. Na prática, isso reduz flexibili-

dade estratégica e amplia risco de lock-in institucional. A literatura sugere cláusulas de interoperabilidade em contratos, uso de APIs abertas e arquitetura modular para reduzir dependências.

- **Complexidade de integração:** conectar sistemas legados e soluções modernas exige camada técnica robusta, equipe especializada e manutenção contínua. Sem esse investimento, a integração torna-se frágil e propensa a falhas operacionais. Como resposta, recomenda-se governança de integração, testes contínuos e arquitetura de serviços com monitoramento permanente (WHAIDUZZAMAN *et al.*, 2022).

A adoção de padrões abertos e arquiteturas orientadas a microserviços é apontada como estratégia para reduzir fragmentação, mas exige coordenação entre atores públicos e privados.

5.5 Questões Econômicas

A transformação de uma cidade convencional em um ecossistema inteligente envolve investimentos vultuosos em sensores, conectividade, plataformas de análise, governança de dados e capacitação de recursos humanos. Além do capital inicial, custos operacionais de manutenção, atualização tecnológica e contratação de expertise técnica são permanentes e crescentes (SINGH *et al.*, 2022; ZAMAN *et al.*, 2024).

Os principais desafios econômicos incluem:

- **Restrição orçamentária estrutural:** muitos municípios, sobretudo de menor porte, operam com baixa margem para investimento em infraestrutura digital. Isso limita expansão tecnológica e aprofunda desigualdades regionais de acesso a serviços inteligentes. A literatura aponta planejamento plurianual e priorização de projetos com maior impacto público como caminhos de viabilização.
- **Retorno sobre investimento pouco demonstrado:** projetos frequentemente carecem de indicadores claros de benefício econômico e social, dificultando sustentação política e financeira no médio prazo. Na prática, iniciativas podem ser interrompidas antes de maturar resultados. Como mitigação, recomenda-se avaliação contínua de impacto com métricas operacionais e socioeconômicas desde o início.
- **Modelos de financiamento frágeis:** a ausência de arranjos financeiros estáveis compromete a continuidade de programas e reduz capacidade de manutenção tecnológica. Esse cenário é agravado quando não há estrutura de governança para parcerias de longo prazo.

Os estudos sugerem modelos híbridos de financiamento, parcerias público-privadas e contratos orientados a desempenho.

- **Custos indiretos subestimados:** integração de sistemas legados, capacitação de equipes, adaptação institucional e governança de dados frequentemente elevam o custo total além do previsto inicialmente. Sem incorporar esses elementos no planejamento, aumenta o risco de desequilíbrio financeiro e baixo desempenho operacional. A literatura recomenda estimativas de custo total de propriedade e implantação incremental (SINGH *et al.*, 2022; ZAMAN *et al.*, 2024).

A literatura aponta que sustentabilidade econômica de cidades inteligentes exige modelos inovadores de financiamento (ex.: bancos de desenvolvimento, concessões tecnológicas, economia de compartilhamento de dados) combinados com demonstração clara de valor público agregado. Sem clareza econômica, iniciativas podem ser descontinuadas por mudanças políticas ou restrições orçamentárias.

6 SÍNTESE CRÍTICA DA LITERATURA

A análise integrada da literatura sobre Internet das Coisas e cidades inteligentes revela um campo em rápida expansão, marcado por promessas tecnológicas significativas, mas também por desafios substanciais que frequentemente não são abordados com a profundidade necessária. Esta síntese consolida os principais achados e identifica lacunas críticas para futuras pesquisas.

6.1 Convergência de tecnologias como fator de viabilidade

Uma evidência robusta na literatura é que nenhuma tecnologia isolada resolve os desafios urbanos contemporâneos. A infraestrutura de comunicação (5G, LPWAN), computação distribuída (edge, fog, nuvem) e inteligência artificial funcionam de forma sinérgica apenas quando integradas por plataformas que padronizam dados, viabilizam interoperabilidade e garantem governança (ZANELLA *et al.*, 2014; SINGH *et al.*, 2022; WHAIDUZZAMAN *et al.*, 2022). Porém, a maioria dos estudos trata essas tecnologias de forma isolada, sem explorar adequadamente as arquiteturas holísticas necessárias para implementação em escala urbana.

6.2 O paradoxo entre potencial técnico e viabilidade operacional

A literatura acadêmica enfatiza frequentemente capacidades técnicas (latência reduzida, processamento em tempo real, integração de múltiplas fontes de dados) sem equilíbrio crítico sobre requisitos operacionais, custos totais de propriedade e capacidade institucional de cidades para absorver e manter essas soluções (SINGH *et al.*, 2022; ZAMAN *et al.*, 2024). Grandes cidades em países desenvolvidos poderiam teoricamente implementar arquiteturas complexas; em contextos de cidades menores ou em economias emergentes, como grande parte das cidades brasileiras, a realidade operacional é substancialmente diferente, criando divisão tecnológica que a literatura aborda apenas superficialmente.

6.3 Segurança e privacidade: riscos subestimados na adoção

Análises críticas apontam que discussões de segurança cibernética em IoT permanecem centradas em vulnerabilidades técnicas (protocolos fracos, falta de autenticação), mas negligenciam ataques de nível organizacional, riscos regulatórios (ex.: LGPD no contexto bra-

sileiro) e consequências de falhas em cascata (KIMANI *et al.*, 2019; LEITE, 2019; CARR *et al.*, 2023). Da mesma forma, privacidade é frequentemente tratada como conformidade legal de pós-factum, em lugar de uma abordagem de privacidade por design desde os estágios iniciais de planejamento urbano.

6.4 Comparação de convergências e divergências

Na literatura sobre IoT e cidades inteligentes, há uma convergência clara em reconhecer que a integração de tecnologias é essencial para viabilizar serviços urbanos inteligentes. A maioria dos estudos concorda que a combinação de conectividade avançada, computação distribuída e inteligência analítica é o caminho para transformar dados urbanos em ações concretas (ZANELLA *et al.*, 2014; SINGH *et al.*, 2022; WHAIDUZZAMAN *et al.*, 2022).

No entanto, existem divergências relacionadas ao contexto em que essas soluções são aplicadas. Enquanto alguns estudos reportam resultados positivos com forte ênfase em eficiência operacional, outros destacam limitações de custo, capacidade estatal e desigualdade territorial, especialmente em realidades de infraestrutura heterogênea. Há também divergências quanto ao equilíbrio entre centralização em nuvem e processamento na borda/névoa, variando conforme exigências de latência, disponibilidade e proteção de dados. Essa comparação evidencia que os achados não são contraditórios em essência, mas fortemente condicionados ao contexto de implementação, o que reforça a necessidade de análises comparativas com métricas operacionais homogêneas e maior transparência metodológica.

6.5 Lacunas em pesquisa sobre modelos de integração urbana

A maioria dos estudos concentra-se em componentes tecnológicos isolados (sensores, protocolos, plataformas) ou em casos de cidades altamente desenvolvidas. Faltam pesquisas profundas sobre:

- Modelos de governança público-privada que viabilizem sustentabilidade financeira e inovação contínua;
- Estratégias de integração incremental que permitam cidades com recursos limitados progressivamente expandir capacidades;
- Análises de impacto social e ambiental reais de iniciativas de cidades inteligentes, em lugar de projeções teóricas;

- Processos de capacitação institucional e transformação cultural necessários para adoção de paradigmas orientados por dados (ZAMAN *et al.*, 2024; SINGH *et al.*, 2022).

6.6 Síntese de recomendações para pesquisa futura com foco operacional

A literatura converge em recomendações que podem tornar as pesquisas futuras mais comparáveis, aplicáveis e úteis à gestão urbana. Em vez de enfatizar apenas adoção tecnológica, os estudos devem adotar um conjunto mínimo de indicadores operacionais que permita avaliar desempenho entre contextos distintos. Entre os indicadores mais relevantes estão a redução de emissões, o tempo de resposta dos serviços urbanos, a quantidade e gravidade de incidentes de segurança, o custo total de implantação e operação das soluções, e métricas de equidade de acesso aos serviços inteligentes.

Também é necessário ampliar o desenho metodológico das pesquisas. Estudos longitudinais são centrais para observar sustentabilidade técnica, econômica e institucional além dos resultados iniciais de curto prazo. Em paralelo, estudos de caso com dados abertos e protocolos reprodutíveis podem melhorar a comparação entre municípios e fortalecer a validação externa dos achados. Esse avanço metodológico deve ser acompanhado de avaliações de impacto social, ambiental e de desempenho de serviços, com foco em efeitos concretos sobre mobilidade, energia, segurança pública, saúde e desigualdades territoriais.

Por fim, recomenda-se incorporar auditorias regulares de governança e conformidade como parte do próprio desenho de pesquisa. Isso inclui verificar aderência à LGPD, mecanismos de accountability, transparência algorítmica e qualidade da supervisão público-privada. Com esse enfoque operacional, a produção científica tende a gerar evidências mais acionáveis para formulação de políticas públicas e para decisões de implementação em cidades com diferentes níveis de maturidade digital.

6.7 Contexto Brasil: especificidades e desafios

No contexto brasileiro, as lacunas de pesquisa são ainda mais profundas que em países desenvolvidos. Enquanto a literatura global frequentemente discute otimização de serviços urbanos já maduros, cidades brasileiras enfrentam desafios estruturais em infraestrutura, capacidade institucional e alinhamento de incentivos entre diferentes atores do ecossistema urbano (CARDOSO, 2019). Uma análise crítica do contexto brasileiro é fundamental para

compreender como tecnologias de IoT podem ser efetivamente adaptadas e implementadas em realidades caracterizadas por heterogeneidade socioeconômica, restrições fiscais persistentes e fragmentação institucional.

6.7.1 Capacidade Institucional e Governança

Um desafio menos visível, mas igualmente crítico, é a capacidade técnica e administrativa de órgãos públicos municipais para desenhar, implementar e gerir sistemas de cidade inteligente. Muitas prefeituras brasileiras, principalmente em municípios de médio e pequeno porte, carecem de equipes especializadas em tecnologia digital, análise de dados e gestão de plataformas IoT. Projetos de cidade inteligente, quando iniciados, frequentemente dependem de parcerias público-privadas ou consultorias especializadas, o que limita a apropriação técnica local e compromete a sustentabilidade de longo prazo das iniciativas (MEIJER; BOLÍVAR, 2016).

A fragmentação institucional também amplifica desafios de governança. Em muitos municípios, diferentes secretarias—mobilidade, energia, meio ambiente, saúde—operam sistemas e bases de dados independentes, sem conexão ou compartilhamento planejado de informações. Iniciativas de IoT urbana carecem, portanto, de uma estrutura de governança de dados que articule essas múltiplas fontes, determine direitos de acesso compartilhado e estabeleça protocolos para coordenação interdepartamental (CARR *et al.*, 2023; ZAMAN *et al.*, 2024). Sem essa coordenação, mesmo tecnologias sofisticadas tendem a gerar silos de informação em lugar de inteligência urbana integrada.

Adicionalmente, mecanismos de transparência e accountability em sistemas automatizados de tomada de decisão (ex.: semáforos adaptativos, alocação dinâmica de recursos de segurança) permanecem pouco desenvolvidos no contexto brasileiro. Não existem diretrizes claras sobre como cidades devem auditar, documentar e comunicar decisões algoritmos ao público, criando riscos de decisões opacas ou potencialmente discriminatórias que passem despercebidas pela sociedade civil.

6.7.2 Marco Regulatório e Conformidade

A promulgação da Lei Geral de Proteção de Dados (LGPD) em 2018, e sua entrada em vigor em 2020, representou avanço significativo no Brasil para proteção de dados pessoais. Contudo, a implementação de LGPD em contextos de cidades inteligentes permanece um desafio

em aberto. Sistemas de IoT urbana tipicamente coletam informações que podem ser diretamente associadas a indivíduos (localização em tempo real, padrões de deslocamento, consumo de energia residencial, etc.), exigindo conformidade rigorosa com princípios de consentimento, finalidade e minimização de dados (Brasil, 2018).

A Carta Brasileira para Cidades Inteligentes (2020) estabelece diretrizes conceituais e princípios orientadores (Ministério do Desenvolvimento Regional / ONU-Habitat, 2020), incluindo ênfase em inclusão, sustentabilidade e transparência. Contudo, ainda não existe marco regulatório específico que traduza esses princípios em requisitos concretos para implementação de sistemas urbanos inteligentes. Cidades carecem, portanto, de guia claro sobre padrões de segurança obrigatórios, interoperabilidade requerida entre sistemas de diferentes fornecedores, ou mecanismos de auditoria de algoritmos em serviços críticos.

6.8 Lacunas por categoria

Para sistematizar as lacunas, a literatura aponta que faltam evidências empíricas e análises críticas aprofundadas em cinco categorias principais:

- **Técnica:** faltam estudos sobre desempenho em escala real, robustez de arquiteturas edge/fog/nuvem em ambientes heterogêneos e interoperabilidade entre plataformas de múltiplos fornecedores.
- **Social:** são limitadas as evidências sobre impacto em qualidade de vida, inclusão digital, participação cidadã e efeitos distributivos entre bairros com diferentes níveis de infraestrutura.
- **Regulatória:** há pouca avaliação empírica de conformidade com LGPD, transparência algorítmica, responsabilização institucional e mecanismos de auditoria contínua.
- **Econômica:** persistem lacunas sobre custo total de propriedade, modelos sustentáveis de financiamento e retorno de investimento em horizontes de médio e longo prazo.
- **Integração:** faltam métodos validados para integração incremental de sistemas legados com novas soluções IoT, preservando continuidade operacional e governança de dados.

6.9 Conclusão da síntese

A transformação de cidades em ecossistemas verdadeiramente inteligentes exige mais que disponibilidade de tecnologias avançadas. Exige integração harmônica de infraestrutura física

e digital, marcos regulatórios adequados, modelos econômicos viáveis e, fundamentalmente, design com foco no serviço público e na qualidade de vida urbana. A literatura atual, embora vasta em profundidade técnica, carece de perspectiva integrada e crítica que considere complexidades operacionais, institucionais e sociais de transformações urbanas de tal magnitude.

7 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo analisar, por meio de revisão narrativa da literatura, como os avanços em Internet das Coisas (IoT) têm contribuído para o desenvolvimento de cidades inteligentes, bem como identificar os principais desafios técnicos, institucionais e econômicos associados à sua adoção em larga escala.

Os resultados evidenciam que a evolução tecnológica ampliou significativamente a capacidade de monitoramento, automação e tomada de decisão em contextos urbanos, com potenciais ganhos em mobilidade, eficiência energética, segurança pública, saúde e gestão ambiental. Contudo, os estudos também demonstram que esses benefícios dependem de condições de implementação que extrapolam o desempenho técnico isolado, exigindo interoperabilidade entre sistemas, governança de dados, segurança cibernética robusta, proteção de privacidade e sustentabilidade financeira dos projetos.

No âmbito dos desafios emergentes, observou-se que segurança e privacidade permanecem como dimensões críticas e frequentemente subestimadas, sobretudo diante da crescente integração entre infraestruturas físicas e digitais. Além disso, a escalabilidade de soluções IoT urbanas, a fragmentação de padrões tecnológicos e as limitações orçamentárias de governos locais configuram barreiras concretas para transição de projetos-piloto para políticas públicas de escala. Em síntese, cidades inteligentes não devem ser compreendidas apenas como ecossistemas tecnologicamente avançados, mas como arranjos sociotécnicos complexos, dependentes de coordenação institucional e capacidade de gestão pública orientada por evidências.

Quanto às limitações desta pesquisa, destaca-se a dependência de estudos secundários e o predomínio de publicações com ênfase em contextos internacionais, o que reduz a disponibilidade de evidências empíricas aprofundadas sobre realidades locais brasileiras. Ainda assim, a revisão permitiu mapear tendências consolidadas, identificar lacunas relevantes e propor uma leitura crítica sobre fatores que condicionam o sucesso de iniciativas de cidade inteligente.

Como perspectivas futuras, recomenda-se o desenvolvimento de estudos aplicados em municípios brasileiros, com avaliação longitudinal de impacto, análise comparativa entre diferentes portes urbanos e formulação de modelos de governança interoperáveis que equilibrem inovação, proteção de direitos e viabilidade econômica. Também se mostra relevante avançar em metodologias de integração incremental, capazes de apoiar cidades com diferentes níveis de maturidade digital.

Conclui-se, portanto, que o avanço da IoT em cidades inteligentes representa uma

oportunidade estratégica para aprimorar serviços públicos e qualidade de vida, desde que acompanhado por planejamento sistêmico, políticas públicas consistentes e compromisso com princípios de segurança, transparência, inclusão e sustentabilidade. O futuro das cidades inteligentes dependerá menos da adoção pontual de tecnologias e mais da capacidade de integrá-las de forma ética, eficiente e socialmente orientada.

REFERÊNCIAS

- ABDALA, L. N.; SCHREINER, T.; COSTA, E. M. da; SANTOS, N. dos. Como as cidades inteligentes contribuem para o desenvolvimento de cidades sustentáveis?: Uma revisão sistemática de literatura. **International Journal of Knowledge Engineering and Management**, v. 3, n. 5, p. 98–120, 2014.
- AHMED, S. F.; ALAM, M. S. B.; AFRIN, S.; RAFA, S. J.; TAHER, S. B.; KABIR, M.; MUYEEN, S.; GANDOMI, A. H. Toward a secure 5g-enabled internet of things: A survey on requirements, privacy, security, challenges, and opportunities. **IEEE Access**, IEEE, v. 12, p. 13125–13145, 2024.
- AKPAKWU, G. A.; SILVA, B. J.; HANCKE, G. P.; ABU-MAHFOUZ, A. M. A survey on 5g networks for the internet of things: Communication technologies and challenges. **IEEE access**, IEEE, v. 6, p. 3619–3647, 2017.
- ATZORI, L.; IERA, A.; MORABITO, G. The internet of things: A survey. **Computer networks**, Elsevier, v. 54, n. 15, p. 2787–2805, 2010.
- BARRETO, O. F. G.; SOUZA, M. R. de. As cidades digitais e o teletrabalho. In: **Anais do Congresso Brasileiro de Processo Coletivo e Cidadania**. [S.l.: s.n.], 2016.
- BENTO, A. K.; KIM, B. Y. J.; CABRAL, G. M.; SILVA, R. C. Desafios do uso de ipv6 em dispositivos iot. Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2024.
- Brasil. **Lei nº 13.709, de 14 de agosto de 2018 (Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais)**. 2018. <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2018/lei/l13709.htm>. Acesso em: 19 mar. 2026.
- CARAGLIU, A.; BO, C. D.; NIJKAMP, P. Smart cities in europe. In: **Creating smart-er cities**. [S.l.]: Routledge, 2013. p. 65–82.
- CARDOSO, D. S. Aspectos atuais da iot: características e desafios. 2019.
- CARR, C. N.; ARAÚJO, A. d. E. S. T.; SEIXAS, L. d. S. F. de; JESUS, P. C. A. de; ARAÚJO, D. S.; ARAUJO, E. N. Modelagem de dados para a internet das coisas (iot): desafios e soluções ao modelar dados gerados por dispositivos conectados. **OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA**, v. 21, n. 12, p. 23858–23874, 2023.
- FIZZA, K.; BANERJEE, A.; MITRA, K.; JAYARAMAN, P. P.; RANJAN, R.; PATEL, P.; GEORGAKOPOULOS, D. Qoe in iot: A vision, survey and future directions. **Discover Internet of Things**, Springer, v. 1, n. 1, p. 4, 2021.
- FORKAN, A. R. M.; KANG, Y.-B.; MARTI, F.; BANERJEE, A.; MCCARTHY, C.; GHADERI, H.; COSTA, B.; DAWOD, A.; GEORGAKOPOULOS, D.; JAYARAMAN, P. P. Aiot-citysense: Ai and iot-driven city-scale sensing for roadside infrastructure maintenance. **Data science and engineering**, Springer, v. 9, n. 1, p. 26–40, 2024.
- HINDEN, R. M.; DEERING, S. E. **Internet Protocol, Version 6 (IPv6) Specification**. 2011. RFC 2460. Updated by RFC 5952. Disponível em: <<https://tools.ietf.org/html/rfc2460>>.
- JOBIN, A.; IENCA, M.; VAYENA, E. The global landscape of ai ethics guidelines. **Nature machine intelligence**, Nature Publishing Group UK London, v. 1, n. 9, p. 389–399, 2019.

KIMANI, K.; ODUOL, V.; LANGAT, K. Cyber security challenges for iot-based smart grid networks. **International journal of critical infrastructure protection**, Elsevier, v. 25, p. 36–49, 2019.

KON, F.; SANTANA, E. F. Z. Cidades inteligentes: Tecnologias, aplicações, iniciativas e desafios. **Jornadas de atualização em informática 2016**, 2016.

LEITE, L. R. C. Internet das coisas (iot): vulnerabilidades de segurança e desafios. 004, 2019.

MARTINS, J. S.; PERIN, A. O.; CASTRO, H. U. *et al.* Cidade inteligente na contemporaneidade com internet das coisas e inteligência artificial. **Gestão & Planejamento-G&P**, v. 25, n. 1, 2025.

MEIJER, A.; BOLÍVAR, M. P. R. Governing the smart city: a review of the literature on smart urban governance. **International review of administrative sciences**, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 82, n. 2, p. 392–408, 2016.

Ministério do Desenvolvimento Regional / ONU-Habitat. **Carta Brasileira para Cidades Inteligentes**. 2020. <<https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/desenvolvimento-urbano-e-metropolitano/projeto-andus/carta-brasileira-para-cidades-inteligentes/CartaBrasileiraparaCidadesInteligentes2.pdf>>. Acesso em: 13 out. 2025.

OLIVEIRA, P.; PEDROSA, I.; BERNARDINO, J. Iot nas smart cities: Revisão da literatura. **RISTI-Revista Iberica de Sistemas e Tecnologias de Informacao (fev. de 2021)**, p. 330, 2021.

Programa Cidades Sustentáveis. **Programa Cidades Sustentáveis**. 2020. <<https://www.cidadessustentaveis.org.br/arquivos/link/relatorio-programa-cidades-sustentaveis-v2-campinas-maio-2020.pdf>>. Acesso em: 13 out. 2025.

SANTOS, B. P.; SILVA, L. A.; CELES, C.; BORGES, J. B.; NETO, B. S. P.; VIEIRA, M. A. M.; VIEIRA, L. F. M.; GOUSSEVSKAIA, O. N.; LOUREIRO, A. Internet das coisas: da teoria à prática. **Minicursos SBRC-Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos**, v. 31, p. 16, 2016.

SHI, W.; CAO, J.; ZHANG, Q.; LI, Y.; XU, L. Edge computing: Vision and challenges. **IEEE internet of things journal**, IEEE, v. 3, n. 5, p. 637–646, 2016.

SINGH, T.; SOLANKI, A.; SHARMA, S. K.; NAYYAR, A.; PAUL, A. A decade review on smart cities: Paradigms, challenges and opportunities. **IEEE Access**, IEEE, v. 10, p. 68319–68364, 2022.

SORNIN, N.; LUIS, M.; EIRICH, T.; KRAMP, T.; HERSENT, O. Lorawan specification. In: LORA ALLIANCE. **LoRa Alliance Technical Committee**. [S.l.], 2015.

STERGIOU, C.; PSANNIS, K. E.; KIM, B.-G.; GUPTA, B. Secure integration of iot and cloud computing. **Future generation computer systems**, Elsevier, v. 78, p. 964–975, 2018.

VAQUERO, L. M.; RODERO-MERINO, L. Finding your way in the fog: Towards a comprehensive definition of fog computing. **ACM SIGCOMM computer communication Review**, ACM New York, NY, USA, v. 44, n. 5, p. 27–32, 2014.

WHAIIDUZZAMAN, M.; BARROS, A.; CHANDA, M.; BARMAN, S.; SULTANA, T.; RAHMAN, M. S.; ROY, S.; FIDGE, C. A review of emerging technologies for iot-based smart cities. **Sensors**, MDPI, v. 22, n. 23, p. 9271, 2022.

YANNUZZI, M.; LINGEN, F. van; JAIN, A.; PARELLADA, O. L.; FLORES, M. M.; CARRERA, D.; PÉREZ, J. L.; MONTERO, D.; CHACIN, P.; CORSARO, A. *et al.* A new era for cities with fog computing. **IEEE Internet Computing**, IEEE, v. 21, n. 2, p. 54–67, 2017.


ZAMAN, M.; PURYEAR, N.; ABDELWAHED, S.; ZOHRABI, N. A review of iot-based smart city development and management. **Smart Cities**, MDPI, v. 7, n. 3, p. 1462–1501, 2024.

ZANELLA, A.; BUI, N.; CASTELLANI, A.; VANGELISTA, L.; ZORZI, M. Internet of things for smart cities. **IEEE Internet of Things journal**, Ieee, v. 1, n. 1, p. 22–32, 2014.

DECLARAÇÃO

Declaro para os devidos fins que este Trabalho de Conclusão (Monografia), escrito sob minha orientação, está em versão final, de acordo com as solicitações realizadas pela banca examinadora. Informo também que procedi à revisão final do texto, constatando que atende às especificações das normas da ABNT para apresentação de trabalhos acadêmicos da UFCA, no que diz respeito ao conteúdo e à formatação.

Juazeiro do Norte, 22 de abril de 2026

Documento assinado digitalmente
 CARLOS JULIAN MENEZES ARAUJO
Data: 22/04/2026 15:17:49-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Carlos Julian Menezes Araújo
Professor Orientador