REVISTA TÓPICOS
ISSN 2965-6672 | Qualis A2

A ENGENHARIA DE SISTEMAS INTELIGENTES PARA CIDADES SUSTENTÁVEIS: DESAFIOS E OPORTUNIDADES

INTELLIGENT SYSTEMS ENGINEERING FOR SUSTAINABLE CITIES: CHALLENGES AND OPPORTUNITIES

Ciências Exatas e da Terra, Engenharias • 06/04/2026

REGISTRO DOI: 10.70773/revistatopicos/775412093

Rômulo Ferreira dos Santos[1]

Cássio Natan Santos Ferreira[2]

Leila de Fátima Oliveira de Jesus Robert[3]

Fabiano Cleber Valadão[4]

Marcus Dhilermando Hora de Souza[5]

RESUMO

A consolidação das cidades sustentáveis no século XXI depende, em grande medida, da capacidade de integrar tecnologias digitais, governança pública e objetivos socioambientais em arranjos urbano-tecnológicos coerentes. Nesse contexto, a engenharia de sistemas inteligentes desponta como campo estratégico para estruturar arquiteturas urbanas orientadas por dados, capazes de ampliar a eficiência operacional, a resiliência climática, a qualidade dos serviços públicos e a participação cidadã. Este artigo analisa como a engenharia de sistemas inteligentes pode acelerar a transição para cidades sustentáveis, articulando Internet das Coisas, inteligência artificial, gêmeos digitais, interoperabilidade, governança de dados e mecanismos de gestão do ciclo de vida dos modelos analíticos. O objetivo central é propor um modelo de referência para projetos de cidade inteligente sustentável, acompanhado de uma matriz de riscos e salvaguardas e de um roteiro de implementação em fases com indicadores vinculados aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Metodologicamente, o estudo adota revisão sistemática qualitativa complementada por análise documental de referenciais técnicos e normativos. Foram mobilizados trabalhos clássicos e contemporâneos sobre cidades inteligentes, cidades sustentáveis, gêmeos digitais urbanos, plataformas de dados, inclusão digital, segurança cibernética, governança algorítmica e financiamento climático urbano, além de documentos institucionais de organismos internacionais e entidades de padronização. Os resultados mostram que o potencial transformador das infraestruturas inteligentes é elevado, sobretudo nas áreas de eficiência energética, mobilidade de baixa emissão, gestão hídrica, monitoramento ambiental, prevenção de riscos e economia circular. Contudo, a literatura e os documentos analisados também evidenciam obstáculos estruturais importantes, como

fragmentação dos dados, baixa interoperabilidade, dependência de fornecedores, exclusão digital, vieses algorítmicos, vulnerabilidades de segurança, custos de operação e lacunas de capacitação institucional. Como principal contribuição, o artigo propõe um quadro socio-técnico em camadas, composto por sensoriamento, comunicação, plataformas de dados, analítica/inteligência artificial e serviços urbanos, sustentado por padrões abertos, governança intersetorial e mecanismos de auditoria contínua. Além disso, apresenta salvaguardas centradas em ética, privacidade, segurança, transparência, documentação de modelos, monitoramento de desempenho e inclusão territorial. Conclui-se que a cidade inteligente sustentável não pode ser concebida apenas como soma de dispositivos e algoritmos. Seu êxito depende da convergência entre infraestrutura digital confiável, políticas públicas inclusivas, contratos públicos que priorizem interoperabilidade e estratégias de financiamento verde capazes de transformar pilotos isolados em sistemas urbanos escaláveis, justos e duráveis.

Palavras-chave: cidades inteligentes; sustentabilidade urbana; Internet das Coisas; inteligência artificial; gêmeos digitais; governança de dados; interoperabilidade; MLOps; justiça climática; segurança cibernética.

ABSTRACT

The consolidation of sustainable cities in the twenty-first century largely depends on the ability to integrate digital technologies, public governance, and socio-environmental goals into coherent urban-technological arrangements. In this context, intelligent systems engineering emerges as a strategic field for structuring data-driven urban architectures capable of enhancing operational efficiency, climate resilience, service delivery, and civic participation. This article examines how intelligent systems engineering can

accelerate the transition toward sustainable cities by articulating the Internet of Things, artificial intelligence, digital twins, interoperability, data governance, and lifecycle management of analytical models. Its central objective is to propose a reference model for sustainable smart city projects, accompanied by a risk-and-safeguard matrix and a phased implementation roadmap with indicators linked to the Sustainable Development Goals. Methodologically, the study adopts a qualitative systematic review complemented by documentary analysis of technical and normative references. Classical and contemporary works on smart cities, sustainable cities, urban digital twins, data platforms, digital inclusion, cybersecurity, algorithmic governance, and urban climate finance were examined, alongside institutional documents from international organizations and standards bodies. The findings show that intelligent urban infrastructures hold major transformative potential, especially in energy efficiency, low-carbon mobility, water management, environmental monitoring, risk prevention, and circular economy strategies. However, the literature and policy documents also reveal important structural barriers, including data fragmentation, low interoperability, vendor lock-in, digital exclusion, algorithmic bias, cyber vulnerabilities, operational costs, and institutional capacity gaps. As its main contribution, the article proposes a layered socio-technical framework composed of sensing, communication, data platforms, analytics/artificial intelligence, and urban services, supported by open standards, cross-sector governance, and continuous auditing mechanisms. It also presents safeguards centered on ethics, privacy, security, transparency, model documentation, performance monitoring, and territorial inclusion. It concludes that a sustainable smart city cannot be understood merely as a sum of devices and algorithms. Its success depends on the convergence of trustworthy digital infrastructure, inclusive

public policy, procurement models that prioritize interoperability, and green finance strategies capable of transforming isolated pilots into scalable, fair, and durable urban systems.
Keywords: smart cities; urban sustainability; Internet of Things (IoT); artificial intelligence (AI); digital twins; data governance; interoperability; MLOps; climate justice; cybersecurity.

1. INTRODUÇÃO

O debate sobre cidades inteligentes amadureceu significativamente nas últimas duas décadas. Se, em um primeiro momento, o conceito foi associado predominantemente à incorporação de tecnologias digitais na gestão urbana, a literatura posterior passou a criticar abordagens excessivamente tecnocêntricas e a defender modelos capazes de articular inovação, sustentabilidade, inclusão social e governança democrática. Albino, Berardi e Dangelico (2015) mostraram que a noção de cidade inteligente se tornou difusa exatamente porque passou a abarcar múltiplas dimensões — infraestrutura, gestão, capital humano, meio ambiente, mobilidade, economia e participação — sem uma arquitetura conceitual suficientemente clara. Batty et al. (2012), por sua vez, já indicavam que a promessa das cidades inteligentes estava vinculada à capacidade de conectar sensores, redes, análise de dados e tomada de decisão em tempo quase real.

Entretanto, a aproximação entre “cidade inteligente” e “cidade sustentável” não é automática. Ahvenniemi et al. (2017) demonstraram que muitos sistemas de avaliação de cidades inteligentes enfatizam intensamente a dimensão tecnológica e econômica, mas nem sempre dão o mesmo peso à sustentabilidade ambiental, à equidade e à justiça territorial. Nesse sentido, a

expressão “cidade inteligente sustentável” representa avanço teórico importante, pois desloca o foco da mera digitalização urbana para a efetiva contribuição dos sistemas inteligentes aos resultados ambientais, sociais e institucionais de longo prazo. Bibri e Krogstie (2017) e Bibri (2018) reforçam essa transição ao propor que desenvolvimento urbano, sustentabilidade e tecnologias da informação devem ser pensados em conjunto, e não como agendas paralelas.

No plano da engenharia, a cidade inteligente sustentável pode ser entendida como um sistema complexo de sistemas: sensores capturam estados do ambiente urbano; redes transportam dados; plataformas de contexto os organizam; mecanismos analíticos e modelos de inteligência artificial produzem inferências; e serviços públicos e privados se reorganizam com base nesses fluxos informacionais. Essa visão sistêmica é coerente tanto com a literatura de Internet das Coisas para cidades quanto com os referenciais de arquitetura orientada à interoperabilidade, que alertam para os limites de soluções isoladas, fechadas e pouco reutilizáveis. Zanella et al. (2014), Gubbi et al. (2013) e o NIST têm insistido que o desafio não é apenas conectar objetos, mas criar ecossistemas interoperáveis, replicáveis e confiáveis.

Mais recentemente, os gêmeos digitais urbanos ampliaram esse horizonte. O conceito deixa de se restringir a visualizações tridimensionais e passa a incorporar sincronização entre espaço físico e ambiente digital, simulações prospectivas, apoio à decisão, testes de cenários e mecanismos de participação cidadã. Deng, Zhang e Shen (2021), Lehtola et al. (2022) e Weil et al. (2023) mostram que o gêmeo digital urbano emerge como uma infraestrutura cognitiva para o governo da cidade, mas também como campo

atravessado por desafios técnicos, institucionais e éticos, especialmente em torno da integração de dados, da validação dos modelos e da governança do uso urbano da inteligência artificial.

Ao mesmo tempo, a agenda recente das organizações internacionais tem ampliado o entendimento de que cidades inteligentes sustentáveis só serão legítimas se forem também inclusivas, centradas nas pessoas e sensíveis às desigualdades digitais. A OCDE destaca que dados urbanos ainda permanecem frequentemente em silos, o que prejudica interoperabilidade e escalabilidade. A ONU-Habitat, por sua vez, reforça que estratégias de cidade inteligente devem enfrentar o fosso digital, e não aprofundá-lo. Estudos empíricos e revisões críticas sobre desigualdades urbanas digitais mostram que o desenho das soluções pode ampliar ou reduzir assimetrias de acesso, participação e benefício.

Nesse cenário, este artigo parte da seguinte questão: **como a engenharia de sistemas inteligentes pode ser estruturada para apoiar a transição para cidades sustentáveis sem reproduzir fragmentação tecnológica, injustiças digitais e dependências institucionais?** O objetivo é responder a essa questão por meio de uma revisão sistemática qualitativa e de uma análise documental, propondo um modelo de referência em camadas, uma matriz de riscos e salvaguardas e um roteiro de implementação capaz de orientar projetos urbanos baseados em dados, inteligência artificial e padrões abertos. O trabalho defende que o êxito dessa transição depende menos de soluções isoladas e mais da articulação entre interoperabilidade, governança, financiamento, segurança, ética e capacidade pública.

2. METODOLOGIA

O estudo foi desenvolvido como **revisão sistemática qualitativa**, complementada por **análise documental técnica e normativa**, com enfoque analítico e propositivo. A revisão partiu da convergência entre três eixos: literatura científica sobre cidades inteligentes e sustentáveis; estudos sobre Internet das Coisas, gêmeos digitais, plataformas urbanas e inteligência artificial; e documentos institucionais sobre governança de dados, indicadores, interoperabilidade, segurança, inclusão digital e financiamento para transição urbana. A estrutura de relato foi inspirada pelos princípios do PRISMA 2020, especialmente no que se refere à transparência dos critérios de seleção e à síntese crítica do material analisado.

No eixo acadêmico, foram priorizados trabalhos de referência que ajudam a delimitar o conceito de cidade inteligente sustentável, os elementos de sua arquitetura socio-técnica e os desafios emergentes da urbanização orientada por dados. Entre esses estudos, destacaram-se Albino, Berardi e Dangelico (2015), Batty et al. (2012), Kitchin (2014), Ahvenniemi et al. (2017), Bibri e Krogstie (2017), Bibri (2018), Zanella et al. (2014), Deng, Zhang e Shen (2021), Lehtola et al. (2022), Weil et al. (2023), White et al. (2021), Kolotouchkina, Ripoll González e Belabas (2024), além de trabalhos e documentos recentes voltados a MLOps, documentação de modelos e governança de IA.

No eixo documental, foram utilizados referenciais de organismos e entidades com papel normativo ou orientador na governança urbano-digital. Entre eles, destacam-se a OCDE, com diretrizes sobre governança de dados urbanos e cidades inteligentes inclusivas; a ONU-Habitat, com as diretrizes internacionais para cidades

inteligentes centradas nas pessoas; a UIT, com os referenciais de indicadores para cidades inteligentes sustentáveis alinhados aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável; o NIST, com fundamentos para cidades e comunidades inteligentes, além dos referenciais de gestão de risco em inteligência artificial e segurança cibernética; e o ecossistema europeu de interoperabilidade, dados abertos e espaços de dados. Também foram considerados mecanismos técnicos como NGSI-LD e os Minimal Interoperability Mechanisms, amplamente mobilizados em iniciativas de dados urbanos abertos e federados.

A seleção do material considerou sua aderência aos seguintes temas: a) engenharia e arquitetura de sistemas urbanos inteligentes; b) sustentabilidade urbana e relação com os ODS; c) interoperabilidade e governança de dados; d) gêmeos digitais e simulação urbana; e) riscos associados a privacidade, segurança, viés e exclusão; f) mecanismos de operacionalização e ciclo de vida da inteligência artificial em contexto urbano; e g) financiamento e governança da implementação em escala. Foram excluídos textos meramente promocionais, publicações sem densidade metodológica e documentos sem vínculo claro com governança ou infraestrutura urbana inteligente.

A análise foi realizada por síntese narrativa crítica. Em vez de buscar mera descrição de tecnologias, o estudo concentrou-se em responder três perguntas: **que arquitetura técnico-institucional torna um projeto urbano mais sustentável e interoperável; quais são os riscos críticos que precisam ser mitigados; e como transformar pilotos em políticas públicas escaláveis**. A partir dessa síntese, foram elaborados três produtos analíticos: um modelo de referência em camadas, uma matriz de riscos e salvaguardas e um

roteiro de implementação em cinco fases com indicadores e conexões com metas dos ODS.

3. RESULTADOS

3.1. Da Cidade Inteligente à Cidade Inteligente Sustentável

A revisão confirma que a noção contemporânea de cidade inteligente sustentável resulta de uma inflexão crítica sobre o paradigma tecnológico inicial. A literatura mais consolidada mostra que cidades inteligentes não devem ser definidas apenas pela presença de sensores, conectividade e plataformas digitais, mas pela capacidade de tais elementos produzirem melhor desempenho urbano, menor impacto ambiental, maior inclusão e governança pública mais responsiva. Albino, Berardi e Dangelico (2015) identificam a multiplicidade de dimensões do conceito, enquanto Ahvenniemi et al. (2017) alertam que boa parte dos marcos de avaliação de “smart cities” supervaloriza infraestrutura digital e competitividade, sem garantir aderência suficiente aos objetivos ambientais e sociais da sustentabilidade. Bibri e Krogstie (2017) propõem justamente a síntese entre urbanismo sustentável e urbanismo orientado por dados como horizonte mais consistente para as cidades do futuro.

Essa conclusão tem implicações práticas relevantes. Em termos de projeto, uma cidade só se aproxima da sustentabilidade quando a inteligência embutida nos sistemas urbanos melhora a eficiência energética, reduz emissões, amplia a resiliência a choques, melhora o uso da água, otimiza fluxos de mobilidade, fortalece a transparência pública e distribui benefícios de forma territorialmente mais equitativa. A digitalização, portanto, não é um

fim em si mesma, mas um meio para atingir metas públicas mensuráveis, como aquelas associadas aos ODS 6, 7, 11 e 12. Documentos da UIT e das Nações Unidas reforçam esse alinhamento ao vincularem indicadores de cidades inteligentes sustentáveis ao monitoramento do progresso urbano em relação aos ODS.

3.2. Proposição de Um Framework Socio-técnico em Camadas

A partir da literatura e dos referenciais técnicos examinados, propõe-se um **framework socio-técnico em cinco camadas** para a engenharia de sistemas inteligentes voltados a cidades sustentáveis.

Camada 1 — Sensoriamento e aquisição de dados. Reúne sensores ambientais, medidores inteligentes, estações meteorológicas, sistemas de mobilidade conectada, câmeras, equipamentos prediais e dispositivos distribuídos em água, energia, resíduos e espaço público. Sua função é captar estados, eventos e fluxos urbanos em tempo adequado à gestão. A literatura de IoT para cidades destaca que essa camada precisa ser heterogênea, modular e orientada a propósito, evitando coleta indiscriminada de dados sem valor operacional.

Camada 2 — Comunicação e conectividade. É responsável pelo transporte seguro e confiável dos dados entre dispositivos, borda computacional, infraestruturas centrais e serviços. Nessa camada, a engenharia deve considerar latência, disponibilidade, redundância, cobertura territorial, consumo energético e segurança das interfaces. O NIST e os estudos de arquitetura para cidades inteligentes insistem que a conectividade deve ser pensada como infraestrutura crítica, e não como simples componente auxiliar.

Camada 3 — Plataforma de dados e contexto. Constitui o núcleo de integração. É aqui que dados heterogêneos são catalogados, normalizados, contextualizados em tempo e espaço, versionados, publicados por interfaces e integrados a regras de governança. As diretrizes da OCDE chamam atenção para o problema recorrente dos silos de dados urbanos. Em resposta, padrões como NGSI-LD, os MIMs e os espaços de dados federados europeus oferecem caminhos concretos para interoperabilidade sem exigir centralização absoluta.

Camada 4 — Analítica avançada, modelos e inteligência artificial. Aqui se concentram modelos preditivos, classificação de eventos, detecção de anomalias, simulações, otimização de rotas, previsão de demanda e sistemas de apoio à decisão. Quando combinada com gêmeos digitais, essa camada permite testar políticas públicas em ambiente virtual antes da intervenção real. Porém, é também a camada onde se intensificam riscos de opacidade, vieses, deriva de dados e decisões automatizadas com impacto desigual sobre grupos sociais e territórios. Por isso, a literatura recente e os referenciais do NIST defendem gestão contínua de risco, documentação dos modelos, validação contextual e supervisão humana apropriada.

Camada 5 — Serviços urbanos e governança de ação. É a camada de entrega de valor público. Nela se inserem aplicativos de mobilidade, plataformas de resposta a eventos extremos, gestão predial inteligente, operação hídrica, coleta e rastreabilidade de resíduos, interfaces de participação cidadã, painéis executivos e rotinas de decisão administrativa. O caso de White et al. (2021) mostra, por exemplo, que gêmeos digitais podem servir não apenas à simulação técnica, mas também à abertura de ciclos de feedback

cidadão em planejamento urbano. Em experiências internacionais como Helsinki 3D e Virtual Singapore, o gêmeo digital aparece como infraestrutura de apoio à simulação, planejamento e integração de serviços.

O valor desse framework não está apenas na divisão em camadas, mas no seu **princípio de desacoplamento interoperável**. Cada camada deve poder evoluir sem aprisionar as demais a um único fornecedor ou a formatos fechados. Isso reduz custos de substituição, amplia reuso, facilita auditoria e torna a infraestrutura pública menos vulnerável ao lock-in tecnológico. O NIST registra que muitas implantações atuais ainda se apoiam em sistemas customizados pouco portáveis e pouco interoperáveis, enquanto a OASC sustenta explicitamente que o uso de padrões abertos e interfaces abertas é central para evitar dependência tecnológica e elevar o retorno do investimento público.

3.3. Desafios Críticos para a Engenharia de Sistemas Inteligentes Urbanos

3.3.1. Fragmentação, Qualidade e Governança dos Dados

O primeiro grande desafio identificado é a fragmentação dos dados urbanos. Em muitas cidades, mobilidade, água, energia, resíduos, segurança, uso do solo e indicadores ambientais permanecem separados por órgãos, contratos, fornecedores e formatos incompatíveis. A OCDE destaca que esses silos dificultam compartilhamento, análise transversal e formulação integrada de políticas públicas. A consequência técnica é grave: sem dados confiáveis, consistentes, atualizados e semanticamente

interoperáveis, a inteligência aplicada à cidade perde robustez e pode gerar diagnósticos errôneos.

A baixa qualidade dos dados também compromete o desempenho dos modelos. Dados ausentes, enviesados, desatualizados ou territorialmente incompletos distorcem inferências e podem produzir decisões urbanas injustas. Em contextos urbanos complexos, a governança de dados precisa ir além do armazenamento: deve incluir metadados, procedência, qualidade, responsabilidade institucional, direitos de acesso e mecanismos de compartilhamento seguro. Isso aproxima a agenda das cidades inteligentes da agenda mais ampla de soberania e dignidade dos dados urbanos.

3.3.2. Interoperabilidade e Lock-in Tecnológico

Outro desafio central é a dependência de soluções fechadas e pouco transferíveis. O NIST descreve como muitas implantações urbanas ainda são baseadas em sistemas proprietários que não se comunicam adequadamente entre si, não são portáveis entre cidades e encarecem tanto expansão quanto manutenção. A OASC, por sua vez, sustenta que mecanismos mínimos de interoperabilidade e uso de padrões abertos são condição para reuso, escalabilidade e redução de lock-in. Para a engenharia pública, isso significa que arquitetura e contratação devem nascer com requisitos de dados abertos, interfaces abertas e modelos semânticos compartilháveis.

3.3.3. Privacidade, Proteção de Dados e Cibersegurança

A intensificação da coleta e do tratamento de dados urbanos eleva significativamente a superfície de risco relacionada à privacidade e à

segurança. Dados de mobilidade, padrões de consumo, imagens, geolocalização e registros de interação com serviços podem expor comportamentos individuais e coletivos. Regulamentos como o GDPR europeu reforçam a necessidade de avaliação de impacto, minimização de dados e medidas proporcionais de proteção. Em paralelo, a Estrutura de Segurança Cibernética 2.0 do NIST mostra que a gestão de risco precisa ser incorporada desde o desenho da infraestrutura, abrangendo identificação, proteção, detecção, resposta e recuperação. Em ambientes urbanos com grande uso de APIs e dispositivos conectados, a segurança dessas interfaces torna-se crítica.

3.3.4. Vieses Algorítmicos e Governança da Inteligência Artificial

A literatura sobre governança de IA aplicada a sistemas públicos converge na necessidade de tratar riscos de viés, opacidade e uso indevido. Em ambientes urbanos, modelos podem afetar priorização de manutenção, distribuição de fiscalização, resposta a ocorrências, planejamento de mobilidade, alocação de infraestrutura ou identificação de áreas críticas. Se os dados de treinamento refletirem desigualdades históricas, o sistema pode reproduzi-las ou aprofundá-las. O NIST AI RMF estabelece que riscos de IA precisam ser tratados de forma integrada com riscos de privacidade e segurança. Mitchell et al. (2019), ao proporem os Model Cards, oferecem instrumento importante de transparência para documentar finalidade, contexto de uso, desempenho, limitações e grupos potencialmente afetados pelos modelos.

3.3.5. Exclusão Digital e Justiça Ambiental

Os ganhos da cidade inteligente não se distribuem automaticamente. A ONU-Habitat destaca que o fosso digital permanece obstáculo central à transformação urbana inclusiva. Caragliu e Del Bo (2023), bem como Kolotouchkina, Ripoll González e Belabas (2024), mostram que a digitalização urbana precisa ser analisada à luz das desigualdades internas das cidades, pois infraestrutura, conectividade, alfabetização digital e participação nos benefícios tecnológicos variam entre bairros e grupos sociais. Em termos de justiça ambiental, isso significa que territórios mais vulneráveis podem continuar sub-representados nos dados e subatendidos nas respostas públicas, a menos que o desenho do sistema incorpore critérios explícitos de equidade.

3.3.6. Custos, Capacidade Institucional e Financiamento

A literatura recente também mostra que o principal gargalo da transformação urbana não é apenas tecnológico, mas institucional e financeiro. Cidades frequentemente dispõem de pilotos, mas não de mecanismos para escalar, operar e manter plataformas ao longo do tempo. Estudos e relatórios sobre cidades climática e digitalmente avançadas indicam dificuldades recorrentes de mobilização de recursos, capacitação técnica e coordenação intersetorial. A JRC e estudos sobre a Missão Europeia de cidades climaticamente neutras mostram que muitos municípios continuam subpreparados financeiramente e institucionalmente para transformar ambição em portfólio executável.

3.4. Oportunidades de Alto Impacto

Apesar dos desafios, a revisão identificou oportunidades concretas e de alto impacto para a engenharia de sistemas inteligentes em

cidades sustentáveis.

A primeira é a **descarbonização e eficiência energética,** sobretudo em edifícios, iluminação pública, climatização urbana e gestão de demanda. A OCDE destaca que soluções inteligentes podem acelerar a transição líquida zero por meio da redução do uso de energia, do melhor aproveitamento de fontes renováveis e da melhoria da operação de sistemas urbanos. Em edifícios e ambientes construídos, a convergência entre IoT, IA e gêmeos digitais é vista como instrumento promissor para otimização energética e manutenção preditiva.

A segunda oportunidade é a **mobilidade sustentável baseada em dados.** Plataformas interoperáveis e modelos analíticos permitem monitorar tráfego, prever demanda, integrar transporte coletivo, identificar gargalos, reduzir emissões e melhorar acessibilidade. A criação de espaços seguros de dados de mobilidade e o compartilhamento controlado de dados de transporte reforçam esse potencial ao permitir maior coordenação entre operadores, governos e serviços digitais.

A terceira é a **gestão hídrica e de resíduos orientada por dados,** com uso de sensores, telemetria, rastreabilidade e algoritmos para reduzir perdas, otimizar rotas, prever falhas e apoiar economia circular. Em paralelo, a integração de dados ambientais e operacionais pode melhorar a prevenção de riscos, especialmente em enchentes, ondas de calor e eventos extremos. Estudos sobre gêmeos digitais urbanos registram seu uso crescente em simulação, evacuação, planejamento e análise de cenários, inclusive com finalidades participativas e de preparação para desastres.

A quarta oportunidade reside na **participação cidadã e transparência baseada em dados abertos.** Casos como Barcelona, Dublin e Helsinki mostram que dados abertos, repositórios urbanos e gêmeos digitais públicos podem apoiar planejamento mais transparente, experimentação cívica e reuso social dos dados. Quando bem governados, dados abertos ampliam controle social, inovação cívica e desenvolvimento de serviços de interesse público.

A quinta oportunidade diz respeito à **economia circular habilitada por plataformas,** na medida em que interoperabilidade de dados, rastreabilidade e inteligência analítica podem conectar fluxos de materiais, cadeias locais de reuso, logística reversa e políticas urbanas de consumo e produção responsáveis. Essa frente dialoga diretamente com o ODS 12 e com o uso de plataformas urbanas para coordenação entre atores públicos e privados.

4. DISCUSSÃO

Os resultados evidenciam que a engenharia de sistemas inteligentes para cidades sustentáveis não pode ser reduzida à soma de dispositivos, redes e aplicações. Seu núcleo é socio-técnico. Isso significa que o desempenho urbano depende simultaneamente da qualidade da arquitetura técnica e da qualidade da governança que a orienta. Quando a cidade é tratada apenas como “mercado de soluções”, aumentam os riscos de fragmentação, sobreposição, baixa integração e dependência tecnológica. Quando, ao contrário, a cidade é tratada como infraestrutura pública de dados e decisão, ganha força a necessidade de padrões, transparência, rastreabilidade e contratos orientados a resultados públicos.

Nesse sentido, a principal contribuição desta discussão é afirmar que **interoperabilidade não é detalhe técnico; é princípio de política pública**. Ela condiciona a soberania tecnológica do município, a capacidade de substituição de componentes, a abertura à inovação de terceiros e a sustentabilidade financeira da operação. Arquiteturas fechadas podem até viabilizar pilotos rápidos, mas frequentemente dificultam expansão, auditoria e integração entre secretarias e concessionárias. Por isso, modelos como NGSI-LD, MIMs e espaços de dados surgem menos como preferência técnica e mais como mecanismos de governança para evitar aprisionamento institucional.

A discussão sobre gêmeos digitais também precisa ser reposicionada. O valor do gêmeo digital urbano não está apenas na visualização tridimensional, mas na capacidade de articular dados, modelos e simulações em apoio a planejamento, operação e participação. Deng, Lehtola e Weil mostram que essa infraestrutura só se torna robusta quando combina integração de dados, atualização contínua, modelagem adequada e consideração dos fatores humanos. Portanto, o gêmeo digital deve ser pensado como instrumento de governança e aprendizagem urbana, e não como vitrine tecnológica.

No campo da inteligência artificial, a literatura consultada converge na necessidade de abandonar a ideia de implantação pontual e adotar uma lógica de **ciclo de vida**. É aqui que MLOps se torna relevante para cidades: versionar dados e modelos, monitorar deriva, revalidar desempenho, registrar incidentes, documentar limites de uso e manter supervisão institucional contínua. Kreuzberger, Kühl e Hirschl defendem que MLOps envolve automação, reprodutibilidade, monitoramento e realimentação contínua. O NIST

AI RMF reforça que IA confiável exige governança, mapeamento, mensuração e gestão. Os Model Cards de Mitchell et al. complementam essa arquitetura de responsabilidade ao oferecer documentação padronizada dos modelos. Em contexto urbano, isso é decisivo para reduzir arbitrariedades, ampliar explicabilidade e evitar uso de modelos fora do escopo para o qual foram validados.

Outro ponto central é que a agenda da sustentabilidade urbana exige deslocamento do foco da eficiência para a justiça. Eficiência sem equidade pode produzir cidades mais otimizadas, porém mais desiguais. A revisão mostra que exclusão digital, vieses nos dados e assimetrias territoriais não são externalidades; são componentes constitutivos da implementação. Daí a importância de incorporar desde o início critérios de acessibilidade, cobertura territorial, governança participativa, abertura de dados, avaliação distributiva dos benefícios e mecanismos de correção voltados a áreas subatendidas. A ONU-Habitat e a literatura recente sobre inclusão digital em cidades inteligentes tornam esse ponto inequívoco.

Por fim, a viabilidade material da cidade inteligente sustentável depende de financiamento, capacidade estatal e coordenação multinível. A literatura sobre transição climática urbana tem mostrado que muitas cidades ainda não dispõem de estrutura para converter estratégia em carteira de projetos bancáveis, monitoráveis e interoperáveis. Isso reforça a necessidade de combinar contratos públicos bem desenhados, financiamento verde, instrumentos de blended finance, apoio técnico e métricas comuns. Em outras palavras, a inteligência da cidade não está apenas nos sensores, mas na capacidade institucional de sustentar a infraestrutura ao longo do tempo.

5. MATRIZ DE RISCOS E SALVAGUARDAS

A partir da síntese realizada, propõe-se a seguinte matriz analítica:

Risco 1 — Dados fragmentados e sem qualidade.
Salvaguardas: política de governança de dados; catálogo de metadados; padrões semânticos; validação de qualidade; responsáveis institucionais por domínio de dado.

Risco 2 — Lock-in tecnológico e baixa portabilidade.
Salvaguardas: exigência contratual de interfaces abertas; modelos de dados abertos; documentação técnica; cláusulas de reversibilidade; adoção de padrões interoperáveis.

Risco 3 — Violação de privacidade e uso excessivo de dados pessoais.
Salvaguardas: minimização de dados; anonimização quando cabível; avaliação de impacto; governança de acesso; desenho com privacidade desde a origem.

Risco 4 — Vulnerabilidades cibernéticas em sensores, APIs e plataformas.
Salvaguardas: gestão contínua de risco; segmentação; autenticação forte; monitoramento; planos de resposta e recuperação; alinhamento à CSF 2.0.

Risco 5 — Viés algorítmico e decisões injustas.
Salvaguardas: auditoria dos dados; testes por grupos e territórios; Model Cards; revisão humana; monitoramento de desempenho e de impacto distributivo.

Risco 6 — Exclusão digital e desigualdade territorial de benefícios.
Salvaguardas: plano de inclusão digital; cobertura em áreas vulneráveis; desenho universal; canais não digitais complementares; avaliação de justiça territorial.

Risco 7 — Incapacidade de sustentar operação e manutenção.
Salvaguardas: análise de custos de ciclo de vida; governança intersetorial; capacitação pública; financiamento verde; escalonamento progressivo por evidências.

6. ROADMAP DE IMPLEMENTAÇÃO EM 5 FASES

Fase 1 — Diagnóstico e governança

Mapeamento de serviços prioritários, bases de dados existentes, infraestrutura de conectividade, marcos regulatórios, capacidades institucionais e desigualdades territoriais. Nessa fase, define-se comitê intersetorial, política de dados e princípios de interoperabilidade.
Indicadores sugeridos: percentual de bases catalogadas; percentual de órgãos aderentes à governança; diagnóstico de cobertura digital por bairro.
ODS mais associados: 11, 16 e 17.

Fase 2 — Infraestrutura digital e integração de dados

Implantação de conectividade crítica, barramento/plataforma de contexto, integração por padrões abertos, API management, catálogo de dados e bases de observabilidade.
Indicadores sugeridos: percentual de domínios integrados; tempo médio de atualização; taxa de interoperabilidade entre sistemas;

número de APIs documentadas.
ODS mais associados: 9, 11 e 17.

Fase 3 — Casos de uso prioritários

Seleção de poucos casos de alto valor público: eficiência energética predial, gestão hídrica, mobilidade, resíduos, resposta a eventos extremos. Implantação de pilotos com metas claras e avaliação de custo-benefício.
Indicadores sugeridos: redução de consumo energético; redução de perdas de água; redução de tempo de deslocamento; aumento de reciclagem; redução de tempo de resposta a eventos.
ODS mais associados: 6, 7, 11, 12 e 13.

Fase 4 — Inteligência artificial, gêmeos digitais e MLOps

Implantação progressiva de modelos analíticos e gêmeos digitais, com versionamento, monitoramento de deriva, documentação de modelos, trilhas de auditoria e critérios de revalidação.
Indicadores sugeridos: percentual de modelos documentados; frequência de revalidação; incidentes detectados; cobertura de monitoramento do ciclo de vida.
ODS mais associados: 9, 11 e 16.

Fase 5 — Escala, abertura e financiamento

Escalonamento territorial e setorial; conexão com dados abertos; revisão contratual para expansão; consolidação de financiamento verde e mecanismos de investimento de longo prazo.
Indicadores sugeridos: número de serviços escalados; percentual de dados não sensíveis abertos; montante captado para expansão; percentual de contratos com cláusulas explícitas de

interoperabilidade.

ODS mais associados: 11, 12, 13, 16 e 17.

7. CONCLUSÃO

A análise realizada permite concluir que a engenharia de sistemas inteligentes possui elevado potencial para acelerar a transição para cidades sustentáveis, desde que seja estruturada a partir de uma visão sistêmica, intersetorial e orientada por objetivos públicos. Internet das Coisas, inteligência artificial, gêmeos digitais, plataformas de contexto e dados abertos oferecem instrumentos poderosos para melhorar a gestão energética, a mobilidade, a água, os resíduos, a resiliência climática e a participação cidadã. Contudo, o valor dessas tecnologias não decorre de sua mera presença, mas de sua inserção em arquiteturas interoperáveis, auditáveis, seguras e socialmente responsáveis.

O artigo demonstrou que os principais riscos da cidade inteligente contemporânea são menos “falhas de inovação” e mais falhas de governança: silos de dados, baixa qualidade informacional, contratos fechados, dependência de fornecedores, opacidade algorítmica, vulnerabilidades cibernéticas, exclusão digital e insuficiência de financiamento para escala. Por isso, o êxito dos projetos urbanos inteligentes não depende apenas de engenharia computacional, mas também de engenharia institucional. A cidade sustentável do futuro exigirá administrações capazes de contratar interoperabilidade, governar dados como infraestrutura pública, documentar modelos de IA e medir desempenho com base em metas ambientais e sociais.

Conclui-se, portanto, que a cidade inteligente sustentável não deve ser concebida como vitrine tecnológica, mas como infraestrutura pública de decisão orientada por dados, justiça territorial e continuidade operacional. Seu avanço dependerá de governança intersetorial robusta, de contratos públicos comprometidos com padrões abertos, de mecanismos de financiamento verde e de uma cultura institucional capaz de transformar pilotos fragmentados em plataformas urbanas resilientes, inclusivas e duráveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHVENNIEMI, H.; HUOVILA, A.; PINTO-SEPPÄ, I.; AIRAKSINEN, M. **What are the differences between sustainable and smart cities?** *Cities*, v. 60, p. 234-245, 2017.

ALBINO, V.; BERARDI, U.; DANGELICO, R. M. **Smart Cities: Definitions, Dimensions, Performance, and Initiatives.** *Journal of Urban Technology*, v. 22, n. 1, p. 3-21, 2015.

BATTY, M.; AXHAUSEN, K. W.; GIANNOTTI, F.; POZDNOUKHOV, A.; BAZZANI, A.; WACHOWICZ, M.; PORTUGALI, Y. **Smart cities of the future.** *The European Physical Journal Special Topics*, v. 214, p. 481-518, 2012.

BIBRI, S. E. **A foundational framework for smart sustainable city development: theoretical, disciplinary, and discursive dimensions and their synergies.** *Sustainable Cities and Society*, v. 38, p. 758-794, 2018.

BIBRI, S. E.; KROGSTIE, J. **Smart sustainable cities of the future: an extensive interdisciplinary literature review.** *Sustainable Cities and Society*, v. 31, p. 183-212, 2017.

CARAGLIU, A.; DEL BO, C. F. **Smart cities and urban inequality.** *Regional Studies*, v. 56, n. 7, p. 1097-1112, 2022.

CARAGLIU, A.; DEL BO, C. F. **Smart cities and the urban digital divide.** *npj Urban Sustainability*, v. 3, 2023.

DENG, T.; ZHANG, K.; SHEN, Z.-J. **A systematic review of a digital twin city: a new pattern of urban governance toward smart cities.** *Journal of Management Science and Engineering*, v. 6, n. 2, p. 125-134, 2021.

GUBBI, J.; BUYYA, R.; MARUSIC, S.; PALANISWAMI, M. **Internet of Things (IoT): a vision, architectural elements, and future directions.** *Future Generation Computer Systems*, v. 29, n. 7, p. 1645-1660, 2013.

KITCHIN, R. **The real-time city? Big data and smart urbanism.** *GeoJournal*, v. 79, n. 1, p. 1-14, 2014.

KOLOTOUCHKINA, O.; RIPOLL GONZÁLEZ, L.; BELABAS, W. **Smart Cities, Digital Inequalities, and the Challenge of Inclusion.** *Smart Cities*, v. 7, n. 6, p. 3355-3370, 2024.

KREUZBERGER, D.; KÜHL, N.; HIRSCHL, S. **Machine Learning Operations (MLOps): Overview, Definition, and Architecture.** *IEEE Access*, v. 11, 2023.

LEHTOLA, V. V.; KOEVA, M.; OUDE ELBERINK, S.; RAPOSO, P.; VIRTANEN, J.-P.; VAHDATIKHAKI, F.; BORSCI, S. **Digital twin of a city: Review of technology serving city needs.** *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 114, 102915, 2022.

MITCHELL, M.; WU, S.; ZALDIVAR, A.; BARNES, P.; VASSERMAN, L.; HUTCHINSON, B.; SPITZER, E.; RAJI, I. D.; GEBRU, T. **Model Cards for Model Reporting.** In: *Proceedings of the Conference on Fairness, Accountability, and Transparency (FAT* '19)*. 2019.

NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY (NIST). **AI Risk Management Framework (AI RMF 1.0).** Gaithersburg: NIST, 2023.

NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY (NIST). **Cybersecurity Framework (CSF) 2.0.** Gaithersburg: NIST, 2024.

NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY (NIST). **Smart Cities and Communities Framework / IES-City Framework.** Gaithersburg: NIST, 2019-2024.

OCDE. **Smart City Data Governance.** Paris: OECD, 2023.

OCDE. **Smart Cities and Inclusive Growth.** Paris: OECD, 2020.

OCDE. **How can smart cities boost the net-zero transition?** Paris: OECD, 2023.

OPEN & AGILE SMART CITIES (OASC). **Minimal Interoperability Mechanisms (MIMs).** Brussels: OASC, 2023-2025.

ONU-HABITAT. **International Guidelines on People-Centred Smart Cities.** Nairobi: UN-Habitat, 2025.

UIT. **Recommendation ITU-T Y.4903: Key performance indicators for smart sustainable cities to assess the achievement of sustainable development goals.** Geneva: ITU, 2022.

WHITE, G.; ZINK, A.; CODECÀ, L.; CLARKE, S. **A digital twin smart city for citizen feedback.** *Cities*, v. 110, 103064, 2021.

WEIL, C.; BIBRI, S. E.; LONGCHAMP, R.; GOLAY, F.; ALAHI, A. **Urban digital twin challenges: a systematic review and perspectives for sustainable smart cities.** *Sustainable Cities and Society*, v. 99, 104862, 2023.

ZANELLA, A.; BUI, N.; CASTELLANI, A.; VANGELISTA, L.; ZORZI, M. **Internet of Things for Smart Cities.** *IEEE Internet of Things Journal*, v. 1, n. 1, p. 22-32, 2014.

---

[1] Doutor em Gestão de Projetos de Tecnologia da Informação e Doutorando em Engenharia Elétrica pela Universidade de Brasília (UnB). E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail

[2] Especialista em Engenharia Ambiental e Saneamento Básico, Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Anhanguera Pitágoras Unopar. E-mail:
acesse o artigo original para visualizar o e-mail

[3] Doutora em Engenharia de Produção pela Universidade do Estado do Pará (UEPA). E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail

[4] Engenheiro Civil pela Universidade de Brasília (UnB). E-mail:
Valadãacesse o artigo original para visualizar o e-mail

[5] Mestre pela Universidade Federal de Viçosa (UFV). E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail