

Sustentabilidade e inovação urbana: Obstáculos e perspectivas na transição energética em cidades inteligentes

Sustainability and urban innovation: Obstacles and perspectives in the energy transition in smart cities

Sostenibilidad e innovación urbana: Obstáculos y perspectivas en la transición energética en ciudades inteligentes

Recebido: 07/10/2025 | Revisado: 17/10/2025 | Aceitado: 18/10/2025 | Publicado: 19/10/2025

Claudiceia Silva Mendes

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9539-6818>

Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil

E-mail: Claudiceiasm@gmail.com

Renata Maria Abrantes Baracho Porto

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8335-9646>

Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil

E-mail: renatambaracho@gmail.com

Resumo

O objetivo deste artigo é buscar compreender os principais desafios e oportunidades que permeiam a transição energética em cidades inteligentes, com um foco nas experiências brasileiras de sandbox urbanos. A metodologia possui abordagem qualitativa e, com revisão de literatura sobre inovação urbana, transição energética, cidades inteligentes e Sandbox urbano, além da análise de documentos de políticas públicas e programas de inovação, tanto no Brasil quanto em outros países, com ênfase nos impactos dos sandboxes urbano, e como essas experiências têm impulsionado a inovação em setores como mobilidade elétrica, iluminação pública inteligente e monitoramento energético. Conclui-se que ambientes de experimentação, como os sandboxes urbanos pode ser uma ferramenta estratégica para acelerar a transição energética nas cidades, através da integração de tecnologias energéticas inovadoras em contextos regulatórios flexíveis favorece respostas ágeis aos desafios urbanos, promovendo um futuro mais resiliente e sustentável.

Palavras-chave: Inovação urbana; Transição energética; Cidades inteligentes; Sandbox; Sustentabilidade.

Abstract

The objective of this article is to understand the main challenges and opportunities that permeate the energy transition in smart cities, with a focus on Brazilian experiences of urban sandboxes. The methodology adopts a qualitative approach, with a literature review on urban innovation, energy transition, smart cities and urban sandboxes, in addition to the analysis of public policy documents and innovation programs in Brazil and in other countries, with an emphasis on the impacts of urban sandboxes and on how these experiences have driven innovation in sectors such as electric mobility, smart public lighting and energy monitoring. It is concluded that experimental environments, such as urban sandboxes, can be a strategic tool to accelerate the energy transition in cities; integrating innovative energy technologies within flexible regulatory contexts enables agile responses to urban challenges and promotes a more resilient and sustainable future.

Keywords: Urban innovation; Energy transition; Smart cities; Sandbox; Sustainability.

Resumen

El objetivo de este artículo es comprender los principales desafíos y oportunidades que permean la transición energética en ciudades inteligentes, con foco en las experiencias brasileñas de sandboxes urbanos. La metodología adopta un enfoque cualitativo, con una revisión de la literatura sobre innovación urbana, transición energética, ciudades inteligentes y sandboxes urbanos, además del análisis de documentos de políticas públicas y programas de innovación en Brasil y en otros países, con énfasis en los impactos de los sandboxes urbanos y en cómo estas experiencias han impulsado la innovación en sectores como la movilidad eléctrica, el alumbrado público inteligente y el monitoreo energético. Se concluye que los ambientes de experimentación, como los sandboxes urbanos, pueden ser una herramienta estratégica para acelerar la transición energética en las ciudades; la integración de tecnologías

energéticas innovadoras en contextos regulatorios flexibles favorece respuestas ágiles a los desafíos urbanos y promueve un futuro más resiliente y sostenible.

Palabras clave: Innovación urbana; Transición energética; Ciudades inteligentes; Sandbox regulatorio; Sostenibilidad.

1. Introdução

Nos últimos anos, a agenda urbana global tem se voltado intensamente para o desenvolvimento sustentável, buscando reduzir a pegada de carbono e promover práticas de transição energética, nesse contexto, as Cidades Inteligentes (CIs), emergem como um paradigma capaz de integrar inovação tecnológica e sustentabilidade em processos urbanos, utilizando soluções digitais e de automação para otimizar a eficiência energética e promover o uso sustentável dos recursos urbanos (Pérez et al., 2021). As CI, também chamado conhecidas na literatura como “Smart Cities” buscam a eficiência de recursos urbanos por meio da integração entre tecnologias digitais, práticas sustentáveis e políticas públicas, facilitando a transição para modelos urbanos mais sustentáveis.

Estudos de autores, como os de Bulkeley et al. (2016) e Marvin et al. (2018), exploram as interseções entre urbanização, sustentabilidade e inovação, destacando como políticas públicas moldam a adoção de tecnologias limpas e práticas sustentáveis nas cidades, enquanto, Frenken (2017) enfatiza a importância de modelos urbanos adaptativos e circulares que integrem inovações tecnológicas de forma inclusiva e eficaz. Além disso, Castán Broto (2020) argumenta que a transição energética exige uma abordagem crítica que considere não apenas os avanços tecnológicos, mas também as desigualdades socioeconômicas e os impactos climáticos, porém uma governança robusta, colaborativa e flexível é essencial para facilitar a experimentação e a implementação de soluções inovadoras no contexto das CI (Khan et al., 2020), além de ser essencial a compreensão da relação entre urbanização e inovação urbana, mostrando como as políticas públicas impactam a integração de tecnologias e práticas sustentáveis, como destaca autores mais clássicos, como Harvey (1989) e Castells (2010).

Diante desse contexto, este estudo busca responder à seguinte pergunta de pesquisa: quais são os principais obstáculos e perspectivas que influenciam a transição energética em cidades inteligentes no contexto brasileiro, e como a inovação urbana pode contribuir para superá-los? O objetivo deste artigo é buscar compreender os principais desafios e oportunidades que permeiam a transição energética em cidades inteligentes, com um foco nas experiências brasileiras de sandbox urbanos.

2. Metodologia

Realizou-se uma pesquisa, do tipo documental de fonte direta (considerando a legislação da Lei da Inovação, a LGPD, a Lei de Liberdade Econômica e, o marco legal das Startups) e, de fonte indireta (Pereira et al., 2018), esta última por meio de revisão de literatura não-sistemática do tipo narrativa (Rother, 2007) com uso de pesquisa no Google Acadêmico que é base livre e gratuita e, com uso das palavras de busca: Inovação urbana; Transição energética; Cidades inteligentes; Sandbox; Sustentabilidade.

A metodologia deste estudo é qualitativa e exploratória, fundamentada em uma abordagem descritiva, que busca compreender em profundidade os processos de sustentabilidade urbana, inovação tecnológica e regulamentação em cidades inteligentes, a opção pelo método qualitativo permite uma análise contextual e detalhada dos documentos e práticas que influenciam a transição energética em ambientes urbanos (Creswell, 2010).

Na coleta de dados, foram considerados documentos de políticas públicas e programas de inovação de cidades brasileiras e internacionais, com foco em regulamentações e experiências dos SU que promovem a inovação sustentável, esse levantamento incluiu leis, decretos, planos de desenvolvimento urbano e energético, além de relatórios institucionais, a análise foi complementada com estudos de caso em cidades brasileiras que implementaram fontes renováveis e práticas de inovação

tecnológica para a transição energética, além de uma revisão de literatura sobre regulamentações e práticas internacionais, facilitando a identificação de padrões e desafios comuns.

A análise de dados foi realizada por meio de uma abordagem comparativa, onde as iniciativas em cidades brasileiras foram analisadas junto com as regulamentações e experiências internacionais de Sandboxes Urbanos (SU), esse processo permitiu avaliar o impacto das regulamentações na implementação de práticas inovadoras e sustentáveis, identificando como as cidades brasileiras podem adaptar modelos internacionais bem-sucedidos (Pérez et al., 2021), proporcionando uma compreensão crítica dos desafios e das perspectivas para a transição energética em cidades inteligentes, ressaltando o papel essencial das regulamentações e políticas públicas no avanço das soluções urbanas sustentáveis.

3. Resultados e Discussão

3.1 Transição energética em cidades inteligentes: fundamentos, desafios e perspectivas

A transição energética ocupa posição central no projeto de cidades inteligentes ao reduzir emissões e ampliar justiça climática, não se restringe somente a tecnologia, demanda mudanças institucionais, sociais e econômicas que garantam acesso equitativo à energia e governança capaz de coordenar múltiplos atores (Geels, 2012; Meadowcroft, 2009).

Cidades inteligentes operam como ecossistemas sociotécnicos que articulam dados, sensores e automação para qualificar serviços públicos e otimizar recurso, a transição energética, por sua vez, traduz-se na reconfiguração de sistemas de provisão, substituindo matrizes fósseis por fontes renováveis e ganhos de eficiência, sendo que esse mesmo movimento depende de trajetórias de inovação, políticas estáveis e aprendizado institucional, com efeitos na infraestrutura física e nos mercados de energia (Markard; Raven; Truffer, 2012).

Redes inteligentes, gestão ativa da demanda, armazenamento, edificações de alto desempenho e mobilidade elétrica compõem um portfólio de soluções que reduz picos, integra renováveis e melhora a confiabilidade do sistema. Em ambientes urbanos complexos, tais inovações exigem desenho institucional e arranjos de governança que habilitem experimentação regulatória, monitoramento contínuo e participação informada da sociedade (Geels, 2011; IEA, 2021). No espaço urbano, o tema ganha urgência: cidades concentram consumo energético e emissões, mas também capacidade de coordenação e difusão de soluções (Seto et al., 2014; Bulkeley et al., 2014).

Os desafios emergem em três frentes. No plano regulatório, marcos moldados por sistemas centralizados dificultam a difusão de geração distribuída, redes inteligentes e armazenamento. Exige-se atualização normativa para acomodar soluções descentralizadas, reduzir incertezas e preservar segurança e confiabilidade do sistema (Castro, 2022 et al., 2020; Khan et al., 2020).

No plano econômico, custos iniciais e riscos tecnológicos limitam escala. Incentivos, garantias, métricas claras de desempenho e parcerias público-privadas elevam bancabilidade e destravam investimento em infraestrutura energética urbana (World Bank, 2017; IEA, 2021). Evita-se, assim, o “lock-in” em soluções subótimas e alinha-se inovação a metas de descarbonização.

No plano social, aceitação pública e engajamento informam a viabilidade de reformas: tarifação horária, mobilidade elétrica e geração fotovoltaica distribuída exigem campanhas de conscientização, transparência e participação (Castro, 2022). Em síntese, a transição energética em cidades inteligentes demanda abordagem integrada: regulação responsiva, financiamento adequado, inclusão social e modernização da infraestrutura. Quando esses vetores se alinham, tecnologias “verdes” deixam de ser pilotos isolados e ganham escala, fortalecendo resiliência e justiça climática (Pérez; García; Martínez, 2021; IEA, 2021).

Em síntese, a convergência entre inovação tecnológica, desenho institucional e políticas públicas orientadas por evidências sustenta a transição energética em cidades inteligentes, esse alinhamento cria condições para descarbonização

progressiva, resiliência e qualidade de vida, sobretudo quando os indicadores são operacionalizados em eixos analíticos e acompanhados por mecanismos de transparência e prestação de contas.

3.2 Sandboxes urbanos: inovação e governança

Os SU são ambientes controlados que permitem testar tecnologias, políticas e modelos de negócio com risco reduzido. Ao flexibilizar regras por tempo e escopo definidos, viabilizam experimentos que, sob marcos rígidos, dificilmente ocorreriam (Chesbrough, 2003).

Como espaços de prova em condições reais, os SU favorecem a introdução de redes inteligentes, mobilidade elétrica e soluções renováveis, ajustando-as às especificidades locais. Esse arranjo acelera a curva de aprendizagem, reduz incertezas e estimula a difusão de inovações urbanas (Markard; Raven; Truffer, 2012). A lógica de cocriação é estruturante, cidadãos, setor público, universidades e empresas coproduzem soluções, combinando conhecimento técnico e experiência de uso, essa dinâmica fortalece a legitimidade social dos projetos e aumenta a chance de escala (Baccarne et al., 2014).

Nos SU, a governança colaborativa atua como mecanismo de coordenação, onde processos participativos, métricas claras e transparência decisória aprimoram a capacidade de adaptação frente a desafios emergentes e alinham inovação a objetivos públicos (Meadowcroft, 2009), em síntese, sandboxes bem desenhados integram experimentação regulatória e aprendizagem institucional, convertendo pilotos em políticas efetivas e serviços urbanos mais eficientes.

Os SU têm se consolidado como espaços cruciais para o desenvolvimento de novas tecnologias urbanas. A seguir, destacam-se exemplos de como essas plataformas têm permitido a implementação de soluções inovadoras em áreas como mobilidade elétrica, iluminação pública inteligente e armazenamento de energia.

A mobilidade elétrica tem sido um dos principais focos das cidades inteligentes, em Barcelona, por exemplo, foi um dos primeiros sandboxes urbanos que testou a integração de ônibus elétricos na rede de transporte público, permitindo a análise de viabilidade técnica e impacto econômico. e de acordo com Khan et al. (2020), a experimentação em ambientes controlados permitiu a adaptação dos sistemas urbanos ao novo modelo de mobilidade, sem prejudicar as políticas públicas em vigor, experiências semelhantes têm sido implementadas em São Paulo, com foco em veículos elétricos autônomos, facilitando o processo de integração dessa tecnologia ao transporte urbano (González et al., 2019).

Com relação a iluminação pública inteligente, Nova York, se destaca pelo uso de sandboxes possibilitando a implementação de sistemas que otimizam o consumo de energia, melhorando a segurança pública e a eficiência energética, o teste dessas tecnologias dentro dos sandboxes permitiu a interação com outras soluções urbanas, como sensores de tráfego, criando sistemas integrados que favorecem a gestão eficiente dos recursos urbanos (Markard et al., 2012).

O Armazenamento de energia nas redes elétricas é crucial para a eficiência das redes elétricas urbanas, tem sido testado em ambientes experimentais em várias cidades, como em Los Angeles, que avaliou a integração de tecnologias de armazenamento de energia, como baterias de íons de lítio, nas redes elétricas residenciais e comerciais, garantindo a estabilidade do sistema e a utilização eficiente das fontes renováveis (González et al., 2019).

3.3 Sandboxes urbanos: vantagens, limites e base normativa brasileira

Com relação aos benefícios, a adoção de SU enfrentam obstáculos, dentre eles a migração para um arranjo regulatório mais flexível tende a suscitar resistência em órgãos tradicionais de regulação, sobretudo quando há incerteza sobre salvaguardas, critérios de entrada e métricas de saída, considerando que para manter legitimidade e escalabilidade, é crucial incorporar participação pública desde o desenho dos SU, garantindo inclusão social, transparência e responsabilidades nos processos decisórios, para garantir transparência, participação pública e métricas de avaliação desde o início, para preservar

legitimidade e escalabilidade, além de garantir processos de engajamento, prestação de contas e acesso equitativo às tecnologias reforçam a aceitação pública e reduzem assimetrias informacionais em contextos urbanos complexos (OECD, 2020).

No Brasil, o arcabouço jurídico já oferece fundamentos relevantes, como podemos ver no Quadro 1, a Lei de Inovação (Lei nº 10.973/2004) estimula cooperação entre instituições públicas e privadas para pesquisa e inovação, com instrumentos de parceria e transferência de conhecimento (arts. 1º–3º, 8º); A LGPD (Lei nº 13.709/2018) assegura o uso responsável de dados, estabelecendo bases legais para tratamento (art. 7º), direitos do titular (art. 18) e a figura do encarregado e supervisão pela ANPD (art. 41); A Lei da Liberdade Econômica (Lei nº 13.874/2019) dispensa alvarás para atividades de baixo risco, reduzindo burocracia em testes sem prejuízo do poder fiscalizatório (art. 3º, I); O Marco Legal das Startups (LC nº 182/2021) define o “ambiente regulatório experimental (sandbox regulatório)” (art. 2º, II) e autoriza órgãos reguladores a instituí-lo e delimitar condições de participação (art. 11).

Quadro 1 - Quadro Resumo das Legislações Relacionadas à Inovação e Sandbox Urbano no Brasil.

Legislação	Número	Data	Principais Objetivos
<i>Lei de Inovação</i>	Lei nº 10.973	2/12/2004	Incentivar a inovação tecnológica, promover parcerias entre instituições de ensino e empresas, e oferecer incentivos fiscais.
<i>Lei Geral de Proteção de Dados (LGPD)</i>	Lei nº 13.709	14/08/2018	Regular o tratamento de dados pessoais, proteger a privacidade dos cidadãos e estabelecer diretrizes para o uso de dados em inovações, incluindo as de sandboxes urbanos.
<i>Lei de Liberdade Econômica</i>	Lei nº 13.874	20/09/2019	Desburocratizar a atividade econômica, promover a liberdade de empreender e facilitar a criação de ambientes de teste (sandbox).
<i>Marco Legal das Startups</i>	Lei nº 18.709	01/06/2021	Estabelecer um ambiente regulatório favorável às startups, simplificar a criação e operação de empresas inovadoras e fomentar investimentos.
<i>Regulamentação de Ambientes de Inovação</i>	—	2021 em diante	Diretrizes do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI) para a criação de sandbox urbanos e ambientes de inovação.

Fonte: Elaborado a partir das Leis nº 10.973/2004, nº 13.709/2018, nº 13.874/2019, nº 18.709/2021.

3.4 Sandboxes regulatórios urbanos e inovação energética: São Paulo, Recife e Foz do Iguaçu

Cidades brasileiras têm explorado sandboxes urbanos (SRU) para acelerar a transição energética, reduzir incertezas regulatórias e testar soluções em ambiente controlado. Os casos de São Paulo, Recife e Foz do Iguaçu ilustram a combinação entre experimentação, governança colaborativa e metas de descarbonização, com ênfase em redes inteligentes, geração distribuída e mobilidade elétrica, ver Quadro 2.

Quadro 2 - Normas municipais sobre sandboxes urbanos de São Paulo, Recife e Foz do Iguaçu.

Município	Instrumento normativo	Nº / Data	Objeto / Escopo	Órgão gestor / Governança	Dispositivos-chave
São Paulo (SP)	Lei municipal que institui o Programa Sampa Sandbox	Lei nº 17.879, 30/12/2022	Institui ambientes experimentais de inovação em escala urbana sob o formato de Bancos de Testes Regulatórios e Tecnológicos (Sandbox). Define objetivos, diretrizes e elegibilidade.	Comitê Gestor do Programa Sampa Sandbox (composição e competências nos arts. 5º–6º).	Chamadas por ciclos experimentais; definição de temas prioritários e áreas de testagem; competência para rever atos e assegurar interesse público.
São Paulo (SP)	Decreto regulamentador do Sampa Sandbox	Decreto nº 62.561, 12/07/2023	Regulamenta a Lei nº 17.879/2022, detalhando procedimentos operacionais do Programa (seleção, acompanhamento e avaliação de projetos).	Mantém a governança via Comitê Gestor; integra secretarias (SMIT, SF, SGM).	Estabelece critérios de entrada, monitoramento e publicação no D.O.; referência à LC 182/2021 (correlação normativa).
Recife (PE)	Decreto municipal – Recife Living Labs (EITA Labs)	Decreto nº 35.511, 01/04/2022	Regulamenta ambientes experimentais de inovação científica, tecnológica, urbanística e empreendedora sob o formato de Bancos de Testes Regulatórios e Tecnológicos.	Conselho/Comitê Gestor do Programa (CCRLL/EITA Labs) com atribuições para editais e coordenação.	Baseia-se na LC 182/2021 e na Lei 13.874/2019; prevê chamadas públicas, zonas/áreas de teste, e métricas para avaliação e eventual escala.
Foz do Iguaçu (PR)	Decreto municipal – Programa Sandbox Foz do Iguaçu	Decreto nº 28.244, 23/06/2020	Regulamenta, no âmbito municipal, a instituição de ambientes experimentais sob o formato de Bancos de Testes Regulatórios e Tecnológicos.	Gestão municipal (Secretarias e parceiros técnicos) para condução dos testes e acompanhamento.	

Fonte: Elaboração própria com base nas normas municipais — São Paulo (Lei nº 17.879, de 30 dez. 2022; Decreto nº 62.561, de 12 jul. 2023), Recife (Decreto nº 35.511, de 1º abr. 2022) e Foz do Iguaçu (Decreto nº 28.244, de 23 jun. 2020) — e em guias internacionais sobre sandboxes regulatórios (OECD, 2020; Ofgem, 2021).

A cidade de São Paulo, no sudeste do país, vem estruturando instrumentos de experimentação regulatória voltados à inovação urbana e energética, alinhando pilotos de smart grids, fotovoltaica e mobilidade elétrica a métricas de desempenho e salvaguardas, o maior centro urbano do Brasil, enfrenta desafios substanciais relacionados à eficiência energética e à sustentabilidade. A cidade tem investido em iniciativas de inovação tecnológica, como as smart grids e a energia solar fotovoltaica. Contudo, obstáculos regulatórios e econômicos ainda dificultam a implementação dessas tecnologias. Conforme Pérez et al. (2021), a introdução de novas tecnologias em grandes centros urbanos é frequentemente obstaculizada por regulamentações rígidas e pela falta de incentivos financeiros adequados. Para superar essas barreiras, a cidade tem adotado o conceito de SU, criando espaços onde novas tecnologias podem ser testadas de forma controlada, fora dos limites das regulamentações tradicionais.

O Sampa Sandbox foi regulamentado pela Lei nº 17.879, de 30 de dezembro de 2022, e pelo Decreto nº 60.041/2021, que inclui o uso de tecnologias como veículos autônomos e mobilidade elétrica, promovendo a redução da pegada de carbono e a melhoria do transporte público, o que favorece a promoção da inovação sem as limitações impostas pelas regulamentações convencionais, além de permitir à administração local adaptar as políticas públicas às necessidades dinâmicas da cidade (Khan et al., 2020).

Recife adotou os SU por meio do Decreto nº 35.511/2022, que institui o Programa Recife Living Labs (EITA Labs) (RECIFE, 2022). Nesse arranjo, a prefeitura e parceiros testam soluções em condições reais, como o primeiro ponto público de recarga para veículos elétricos, e articulam iniciativas de energia solar em equipamentos municipais, a exemplo do Programa Escola Solar no Grau (Prefeitura do Recife, 2023; Prefeitura do Recife, 2022). Essas ações combinam experimentação

regulatória, cooperação público-privada e metas de sustentabilidade, fortalecendo a aprendizagem institucional e a difusão de inovações urbanas (Recife, 2022).

Recife também tem adotado o modelo de SU para testar soluções como sistemas de armazenamento de energia e micro-redes solares em áreas periféricas, ajustando as políticas públicas de maneira ágil e eficiente, sem as limitações impostas pela regulamentação tradicional. A colaboração público-privada tem sido um fator-chave para o sucesso dessas iniciativas, consolidando Recife como um modelo de inovação sustentável (Prefeitura do Recife, 2023).

Foz do Iguaçu regulamenta ambientes experimentais de inovação por meio do Decreto nº 28.244, de 23 de junho de 2020, que institui os “Bancos de Testes Regulatórios e Tecnológicos” no âmbito municipal (Prefeitura Municipal de Foz do Iguaçu, 2020). Em termos de desenho e operação, sandboxes urbanos permitem delimitar escopo e tempo de testes, ajustar requisitos técnicos, definir salvaguardas e métricas de avaliação antes da adoção em larga escala, em consonância com boas práticas internacionais (OECD, 2020; Ofgem, 2021). No plano federal, o Marco Legal das Startups reconhece o “ambiente regulatório experimental” e confere base jurídica para a instituição e a gestão desses programas, reforçando segurança regulatória e critérios de elegibilidade (Brasil, 2021). Em cidades com agenda de transição energética, esse arranjo facilita a validação de soluções como geração distribuída, mobilidade elétrica e gestão ativa da demanda, preservando o interesse público e a transparência nos processos decisórios (OECD, 2020; Ofgem, 2021).

São Paulo, Recife e Foz do Iguaçu evidenciam o papel dos sandboxes regulatórios urbanos (SRU) como catalisadores da transição energética. Ao delimitar escopo, tempo e salvaguardas, esses arranjos permitem testar, validar e ajustar soluções — geração distribuída, armazenamento, gestão ativa da demanda e mobilidade elétrica — antes da adoção ampla, reduzindo incertezas e custos de transação. As lições extraídas dos pilotos orientam políticas públicas baseadas em evidências e criam trajetórias de escala, com ganhos de eficiência, resiliência e descarbonização.

4. Considerações Finais

Sandboxes urbanos aceleram a transição energética em cidades inteligentes ao oferecer ambientes seguros de teste, com escopo, duração e salvaguardas definidos. Vinculados a políticas públicas claras e a modelos de governança inclusivos, permitem ajustar tecnologias e regras antes da adoção ampla, reduzindo incertezas e elevando a qualidade das decisões.

As experiências observadas indicam um caminho robusto: pilotos estruturados, métricas transparentes e cooperação entre governo, universidades, empresas e sociedade civil. Essa estrutura de experimentação antecipa efeitos regulatórios, mitiga riscos e cria condições para integrar geração distribuída, armazenamento, mobilidade elétrica e gestão ativa da demanda na infraestrutura existente.

É necessário superar resistências institucionais, aprimorar a coordenação intersetorial, ampliar o acesso a financiamento e fortalecer capacidades técnicas nas equipes responsáveis, além de incorporar desde o início critérios de inclusão social, proteção de dados, prestação de contas e mecanismos de encerramento e escala. Em síntese, SRU funcionam como alavancas estratégicas de descarbonização e resiliência urbana, quando ancorados em governança integrada e senso de justiça social, convertem “laboratórios” em políticas efetivas e escaláveis, consolidando a transição energética como agenda de Estado e não apenas de projetos pontuais.

Referências

ABDI – Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial. (2021). *Sandbox para cidades inteligentes*. ABDI.

Agyemang, G., Kyeremeh, E., & Osei, K. (2020). Community engagement in renewable energy projects: Barriers and opportunities. *Journal of Sustainable Development*, 13(4), 45–56. <https://doi.org/10.5539/jsd.v13n4p45>

- Almeida, M. E., & Fernandes, T. C. (2022). Cidades inteligentes e governança urbana: Uma análise da implementação em capitais brasileiras. *Revista Brasileira de Gestão Urbana*, 17(3), 87–102.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2021). *ABNT NBR ISO 37120:2021 — Cidades e comunidades sustentáveis: Indicadores para serviços urbanos e qualidade de vida*. ABNT.
- Baccarne, B., Mechant, P., & Schuurman, D. (2014). Urban living labs: Experimenting with collaborative innovation in smart city development. *Journal of Innovation Management*, 2(1), 15–25.
- Bibri, S. E. (2021). Data-driven smart sustainable cities of the future: State-of-the-art review. *Sustainable Futures*, 3, 100047. <https://doi.org/10.1016/j.sfr.2021.100047>
- Bibri, S. E. (2021). A novel model for data-driven smart sustainable cities of the future: The institutional transformations required for balancing and advancing the three goals of sustainability. *Energy Informatics*, 4(1), 4. <https://doi.org/10.1186/s42162-021-00138-8>
- Brasil. (2004). *Lei nº 10.973, de 2 de dezembro de 2004* (Lei de Inovação). Diário Oficial da União.
- Brasil. (2018). *Lei nº 13.709, de 14 de agosto de 2018* (Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais). Diário Oficial da União.
- Brasil. (2019). *Lei nº 13.874, de 20 de setembro de 2019* (Lei da Liberdade Econômica). Diário Oficial da União.
- Brasil. (2021). *Lei Complementar nº 182, de 1º de junho de 2021* (Marco Legal das Startups). Diário Oficial da União.
- Bridge, G., & Gailing, L. (2020). New energy spaces: Towards a geographical political economy of energy transition. *Environment and Planning A: Economy and Space*, 52(6), 1037–1050. <https://doi.org/10.1177/0308518X20939570>
- Broto, V. C. (2020). Climate urbanism: Towards a critical research agenda. *WIREs Climate Change*, 11(4), e645. <https://doi.org/10.1002/wcc.645>
- Bulkeley, H., Marvin, S., & Voytenko Palgan, Y. (2016). Urban living labs: Governing urban sustainability transitions. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 22, 13–17. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2017.02.003>
- CAF – Banco de Desarrollo de América Latina. (2024). *La transición energética de América Latina y el Caribe: Una oportunidad para el desarrollo sostenible*. <https://scioteca.caf.com/handle/123456789/2340>
- Castan Broto, V., Robin, E., & While, A. (Eds.). (2020). *Climate urbanism: Towards a critical research agenda*. Palgrave Macmillan. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-53386-1>
- Castells, M. (2010). *The rise of the network society* (2nd ed.). Wiley-Blackwell.
- CASTELLS, Manuel. A Sociedade em Rede. 11 ed. São Paulo: Paz e Terra, 2008. pp. ISBN
- Castro, N. de. (2022). *O futuro das distribuidoras de energia elétrica*. GESEL/UFRJ. https://gesel.ie.ufrj.br/wp-content/uploads/2022/11/Castro_2022_11_07.pdf
- CEPAL. (2023). *Transición energética justa y sostenible en América Latina y el Caribe*. CEPAL. https://www.cepal.org/sites/default/files/news/files/cepal_alc_transicion_energetica.pdf
- Chesbrough, H. (2003). *Open innovation: The new imperative for creating and profiting from technology*. Harvard Business School Press.
- Creswell, J. W. (2010). *Projeto de pesquisa: Métodos qualitativo, quantitativo e misto* (2ª ed.; Trad. M. Lopes). Artmed.
- Evans, J., Karvonen, A., & Raven, R. (Eds.). (2016). *The experimental city*. Routledge.
- Evans, J., Karvonen, A., & Raven, R. (2019). Smart and sustainable cities? Pipedreams, practicalities and possibilities. *Local Environment*, 24(7), 557–564. <https://doi.org/10.1080/13549839.2019.1624701>
- Geels, F. W. (2011). The multi-level perspective on sustainability transitions: Responses to seven criticisms. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 1(1), 24–40.
- Goldemberg, J., & Lucon, O. (2010). *Energy, environment and development* (2nd ed.). Earthscan/Routledge.
- International Energy Agency. (2021). *Net zero by 2050: A roadmap for the global energy sector*. IEA. <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
- International Organization for Standardization. (2018). *ISO 37120:2018 — Sustainable cities and communities: Indicators for city services and quality of life*. ISO.
- Leite, C., & Awad, J. C. M. (2012). *Cidades sustentáveis, cidades inteligentes*. Bookman.
- Luque-Ayala, A., & Silver, J. (Eds.). (2016). *Energy, power and protest on the urban grid: Geographies of the electric city*. Routledge.
- Markard, J., Raven, R., & Truffer, B. (2012). Sustainability transitions: An emerging field of research and its prospects. *Research Policy*, 41(6), 955–967. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2012.02.013>
- Meadowcroft, J. (2009). What about the politics? Sustainable development, transition management, and long-term energy transitions. *Policy Sciences*, 42(4), 323–340. <https://doi.org/10.1007/s11077-009-9097-z>

- OECD. (2020). *Regulatory sandboxes and innovation*. OECD Publishing. <https://www.oecd.org/innovation/regulatory-sandboxes.htm>
- Ofgem. (2021). *Energy Regulation Sandbox (v2.0): Guidance*. Office of Gas and Electricity Markets. <https://www.ofgem.gov.uk>
- Pereira, A. S., et al. (2018). *Metodologia da pesquisa científica*. Editora UFSM.
- Pérez, A., Oliveira, L., & Ribeiro, T. (2021). Smart cities e sustentabilidade: O papel do mercado de carbono. *Journal of Urban Sustainability*, 7(1), 45–60.
- Prefeitura Municipal de Foz do Iguaçu. (2020, 23 junho). *Decreto nº 28.244/2020 — Programa Sandbox*. Prefeitura Municipal de Foz do Iguaçu.
- Recife (Município). (2022, 1 abril). *Decreto nº 35.511/2022 — Recife Living Labs (EITA Labs)*. Prefeitura do Recife.
- Rother, E. T. (2007). Revisão sistemática x revisão narrativa. *Acta Paulista de Enfermagem*, 20(2), 1–2. <https://doi.org/10.1590/S0103-21002007000200001>
- São Paulo (Município). (2023, 12 julho). *Decreto nº 62.561/2023 — Regulamenta a Lei nº 17.879/2022 (Programa Sampa Sandbox)*. Prefeitura do Município de São Paulo.
- Seto, K. C., Dhakal, S., Bigio, A., Blanco, H., Delgado, G. C., Dewar, D., ... Ürge-Vorsatz, D. (2014). Human settlements, infrastructure and spatial planning. In *Climate change 2014: Mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the IPCC* (Chap. 12). Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/human-settlements-infrastructure-and-spatial-planning/>
- Veloso, Á., Fonseca, F., & Ramos, R. (2024). Insights from smart city initiatives for urban sustainability and contemporary urbanism. *Smart Cities*, 7(6), 3188–3209. <https://doi.org/10.3390/smartcities7060124>