

A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA NOS TRANSPORTES PÚBLICOS: DESAFIOS E OPORTUNIDADES**THE ENERGY TRANSITION IN PUBLIC TRANSPORT: CHALLENGES AND OPPORTUNITIES** <https://doi.org/10.63330/aurumpub.001-014>

Antônio Rosevaldo Ferreira da Silva
Mestre em Análise Regional pela Unifacs
Professor da Uefs
E-mail: rosevaldo@uefs.br

RESUMO

Este artigo analisa a transição energética no setor de transportes públicos, com foco nos desafios e nas oportunidades envolvidas nesse processo. A pesquisa considera os aspectos técnicos, econômicos e institucionais que influenciam a adoção de soluções mais limpas e eficientes, como a eletrificação da frota e o uso de combustíveis alternativos, a exemplo do hidrogênio verde e do biometano. Destacam-se também os altos custos iniciais de implantação de novas tecnologias, a necessidade de infraestrutura de recarga, além da resistência de operadores tradicionais à mudança de modelos operacionais. O estudo enfatiza a importância das políticas públicas como catalisadoras da mudança, apontando incentivos fiscais, subsídios e metas de descarbonização como mecanismos-chave para acelerar a transição. Também se discute o papel central do planejamento urbano sustentável, que deve integrar mobilidade inteligente, densificação urbana e priorização do transporte coletivo para maximizar os benefícios ambientais e sociais. Além disso, o artigo ressalta que a transição energética não é apenas uma questão tecnológica, mas também envolve decisões políticas, engajamento social e cooperação entre diferentes níveis de governo. A adoção de tecnologias limpas no transporte público representa uma oportunidade estratégica para reduzir as emissões de gases de efeito estufa, melhorar a qualidade do ar nas cidades e promover um modelo de desenvolvimento mais justo e resiliente.

Palavras-chave: Transição energética; Transporte público; Eletrificação; Combustíveis alternativos; Planejamento urbano sustentável; Políticas públicas; Descarbonização; Mobilidade urbana.

ABSTRACT

This article analyzes the energy transition in the public transport sector, focusing on the challenges and opportunities involved in this process. The research considers the technical, economic and institutional aspects that influence the adoption of cleaner and more efficient solutions, such as the electrification of the fleet and the use of alternative fuels, such as green hydrogen and biomethane. It also highlights the high initial costs of implementing new technologies, the need for recharging infrastructure, and the resistance of traditional operators to changing operating models. The study emphasizes the importance of public policies as catalysts for change, pointing to tax incentives, subsidies and decarbonization targets as key mechanisms for accelerating the transition. It also discusses the central role of sustainable urban planning, which must integrate intelligent mobility, urban densification and prioritization of public transport to maximize environmental and social benefits. In addition, the article emphasizes that the energy transition is not just a technological issue, but also involves political decisions, social engagement and cooperation between different levels of government. The adoption of clean technologies in public transport represents a strategic opportunity to reduce greenhouse gas emissions, improve air quality in cities and promote a fairer and more resilient development model.



Keywords: Energy transition; Public transport; Electrification; Alternative fuels; Sustainable urban planning; Public policies; Decarbonization; Urban mobility.



1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a intensificação das mudanças climáticas, impulsionada principalmente pela emissão de gases de efeito estufa (GEE), tem pressionado governos, empresas e a sociedade civil a repensarem seus modelos de desenvolvimento. Nesse contexto, o setor de transportes figura como um dos principais responsáveis pelas emissões globais de carbono, especialmente em centros urbanos, onde o uso intensivo de combustíveis fósseis no transporte público contribui significativamente para a degradação ambiental e para a crise climática (IPCC, 2023).

A transição energética no transporte público emerge como uma estratégia essencial para reduzir essa pegada de carbono e promover uma mobilidade mais limpa e eficiente. Ela envolve a substituição gradual de fontes fósseis por alternativas sustentáveis, como a eletrificação da frota e o uso de combustíveis renováveis, como biometano, hidrogênio verde e biodiesel de segunda geração. Essa mudança, no entanto, não se limita à dimensão tecnológica. Trata-se de um processo complexo, que demanda mudanças institucionais, investimentos públicos e privados, reestruturação de políticas urbanas e engajamento da população (GUIMARÃES; RIBEIRO, 2020).

A eletrificação do transporte coletivo, por exemplo, já vem sendo testada em diversas cidades brasileiras e internacionais, com resultados promissores em termos de redução de poluentes locais e melhoria da qualidade do ar (REZENDE et al., 2021). No entanto, os altos custos iniciais, a infraestrutura de recarga ainda limitada e a falta de incentivos estruturais representam barreiras significativas à sua ampla adoção, especialmente em países em desenvolvimento.

Além dos aspectos técnicos e econômicos, há também desafios institucionais, como a fragmentação das competências entre os diferentes níveis de governo, a ausência de um planejamento urbano integrado e a resistência de operadores tradicionais à adoção de novas tecnologias (MOURA; SILVA, 2019). Por outro lado, existem oportunidades claras: a criação de empregos verdes, a valorização de cadeias produtivas locais e o fortalecimento de políticas públicas orientadas à sustentabilidade urbana.

A transição energética nos transportes públicos também está diretamente conectada ao conceito de justiça climática, pois afeta principalmente populações mais vulneráveis, que dependem do transporte coletivo e são desproporcionalmente impactadas pela poluição e pela ineficiência dos sistemas atuais. Assim, uma transformação bem planejada pode gerar benefícios sociais, econômicos e ambientais, alinhando-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) propostos pela ONU.

Este artigo, portanto, busca discutir os principais desafios e oportunidades relacionados à transição energética no transporte público, com ênfase na eletrificação da frota e no uso de combustíveis alternativos, à luz de experiências recentes e literatura especializada. O objetivo é contribuir para o debate sobre caminhos viáveis para uma mobilidade urbana mais sustentável, eficiente e socialmente justa.



2 CONTEXTO E IMPORTÂNCIA DA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

2.1 EMISSÕES DE CARBONO E IMPACTO AMBIENTAL DOS TRANSPORTES PÚBLICOS

O setor de transportes é um dos maiores emissores de gases de efeito estufa (GEE) no mundo. No Brasil, essa realidade também se reflete nos centros urbanos, onde o transporte público baseado em combustíveis fósseis — como diesel e gasolina — continua sendo amplamente utilizado. Segundo dados do Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2022), o setor de transportes representa aproximadamente 47% das emissões de CO₂ relacionadas à energia no país, sendo o transporte rodoviário o principal responsável.

Embora o transporte público seja, em teoria, mais eficiente em termos de emissões por passageiro, o uso predominante de ônibus movidos a diesel contribui significativamente para a poluição atmosférica e para o agravamento de problemas respiratórios nas grandes cidades. Estudos mostram que a queima de diesel em áreas urbanas libera material particulado fino (PM_{2,5}), óxidos de nitrogênio (NO_x) e outros poluentes, que afetam diretamente a saúde da população (SILVA et al., 2021).

Além dos impactos na saúde, a dependência de combustíveis fósseis gera custos ambientais e econômicos elevados, associados à emissão de GEE e à necessidade de importação de derivados de petróleo. A continuidade desse modelo representa um entrave à mitigação das mudanças climáticas e ao cumprimento de compromissos internacionais, como o Acordo de Paris. Para que o transporte público seja parte da solução, e não do problema, é urgente acelerar sua transição energética.

Iniciativas como a eletrificação da frota e o uso de biocombustíveis avançados têm surgido como alternativas viáveis para reduzir as emissões. A introdução de ônibus elétricos, por exemplo, pode reduzir em até 90% as emissões locais de poluentes e em mais de 70% as emissões de CO₂, dependendo da matriz energética utilizada (REZENDE et al., 2021). No entanto, essas tecnologias ainda enfrentam barreiras como o alto custo inicial e a falta de infraestrutura de apoio, como pontos de recarga.

É importante destacar que a transição energética nos transportes públicos não deve ser pensada apenas como uma mudança tecnológica, mas também como uma transformação estrutural, que envolve planejamento urbano, políticas públicas integradas e participação social. A superação dos impactos ambientais do setor passa, necessariamente, pela priorização de modais coletivos, não motorizados e movidos a energias limpas.

Dessa forma, a transição para sistemas de transporte público menos poluentes representa não apenas uma resposta à crise climática, mas também uma oportunidade de melhorar a qualidade de vida urbana, reduzir desigualdades e promover justiça ambiental.

2.2 O PAPEL DOS TRANSPORTES PÚBLICOS NA MITIGAÇÃO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

O transporte público exerce um papel estratégico na mitigação das mudanças climáticas, especialmente nas grandes cidades, onde a concentração de veículos particulares e a queima de



combustíveis fósseis são responsáveis por uma parcela significativa das emissões de gases de efeito estufa (GEE). Ao promover o deslocamento coletivo e eficiente, o transporte público reduz o número de veículos nas vias, o consumo energético e, consequentemente, as emissões. Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA, 2022), investimentos em transporte coletivo limpo e eficiente podem reduzir em até 40% as emissões do setor até 2050.

No Brasil, essa abordagem é crucial diante do crescimento urbano desordenado e da priorização histórica do automóvel. Moura e Silva (2019) apontam que cidades com transporte público eficiente não apenas reduzem suas emissões de CO₂, mas também apresentam maior equidade social. Além disso, Oliveira et al. (2020) defendem que a expansão de redes de transporte de massa, como metrô e corredores de ônibus, deve estar alinhada com políticas habitacionais e de uso do solo para maximizar seus benefícios ambientais.

A transição energética no transporte coletivo, com foco em veículos elétricos, híbridos ou movidos a biocombustíveis sustentáveis, é uma oportunidade real de acelerar essa mitigação. Guimarães e Ribeiro (2020) destacam que a substituição de ônibus a diesel por modelos elétricos pode reduzir em até 70% as emissões diretas de GEE, além de melhorar a qualidade do ar urbano. Já Silva e Lima (2021) argumentam que políticas de subsídios e incentivos fiscais são fundamentais para viabilizar economicamente essa modernização.

Além da tecnologia, o modelo de mobilidade adotado nas cidades precisa ser repensado. Cidades compactas e integradas — com serviços próximos e conectadas por transporte público de qualidade — tendem a reduzir o número e a duração dos deslocamentos, como destacam Vasconcellos (2013) e Cervero e Sullivan (2011). Nesse sentido, o conceito de desenvolvimento orientado ao transporte (Transit-Oriented Development – TOD) tem sido aplicado com sucesso em diversas cidades do mundo, unindo mobilidade, planejamento urbano e sustentabilidade.

Não menos importante é a governança. Magrini et al. (2021) ressaltam que a articulação entre diferentes níveis de governo, operadores de transporte, setor privado e sociedade civil é essencial para construir soluções duradouras. A ausência de planejamento integrado e a descontinuidade de políticas públicas ainda são barreiras recorrentes no contexto brasileiro.

Assim, o transporte público tem um papel central na resposta à crise climática. Para além da mobilidade, ele é uma ferramenta de transformação urbana, inclusão social e justiça ambiental. Inserir o transporte coletivo limpo como eixo estruturante das políticas públicas é essencial para qualquer cidade que busque sustentabilidade de longo prazo.

2.3 EXPERIÊNCIAS INTERNACIONAIS BEM-SUCEDIDAS NA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA DO SETOR

Diversas cidades e países ao redor do mundo têm se destacado pela adoção de políticas e ações concretas voltadas à transição energética no setor de transporte público. Essas experiências internacionais bem-sucedidas demonstram que a descarbonização da mobilidade urbana é possível, desde que haja planejamento integrado, investimento estruturado, compromisso político e participação ativa da sociedade.

Um dos exemplos mais relevantes é o de Shenzhen, na China, que se tornou a primeira cidade do mundo a eletrificar 100% de sua frota de ônibus. Com mais de 16 mil veículos elétricos operando desde 2017, a cidade reduziu de forma expressiva as emissões locais e melhorou a qualidade do ar. De acordo com o World Resources Institute (WRI, 2020), essa transformação foi possível por meio de uma política pública coesa, forte envolvimento do governo central e local, subsídios diretos à compra de ônibus e à infraestrutura de recarga, além de apoio de empresas tecnológicas, como a BYD. Shenzhen se tornou um símbolo global de que eletrificação em larga escala é viável, mesmo em cidades com grande demanda por transporte.

Na Colômbia, Bogotá tem implementado uma transição progressiva em sua rede de ônibus TransMilenio. Desde 2021, centenas de ônibus elétricos começaram a operar em rotas de grande fluxo, com o apoio de financiamento internacional e parcerias com bancos multilaterais. A cidade estabeleceu metas claras para redução de emissões, mostrando que mesmo em países com menos recursos é possível avançar em direção à mobilidade de baixo carbono (BANCO MUNDIAL, 2022).

Santiago, no Chile, também avançou significativamente com o sistema RED, que incorporou mais de 1.000 ônibus elétricos em sua frota metropolitana. Essa ação, apoiada por políticas nacionais de eletromobilidade e investimentos privados, tem como objetivo não apenas reduzir as emissões, mas também melhorar o serviço prestado à população. Segundo a CEPAL (2021), a eletromobilidade tem sido tratada como parte de uma estratégia mais ampla de transição energética, com incentivos fiscais e apoio técnico a operadores locais.

Na Europa, cidades como Oslo, Amsterdam e Paris adotaram abordagens mais integradas, unindo políticas de transporte com planejamento urbano e metas climáticas. Oslo, capital da Noruega, lidera o movimento por um transporte público totalmente livre de emissões. Até 2023, toda a frota municipal de ônibus passou a operar com eletricidade ou biogás, parte de uma meta nacional de zerar as emissões líquidas até 2030 (C40 CITIES, 2021). O sucesso de Oslo se deve, entre outros fatores, à robusta política de incentivos à mobilidade sustentável, com restrições ao uso de carros no centro da cidade, estacionamento caro e uma ampla rede de ciclovias.

Já Amsterdam, na Holanda, integrou sua estratégia de transição energética com o estímulo ao transporte ativo, como bicicletas, e a proibição progressiva de veículos movidos a combustíveis fósseis no



centro até 2030. Além disso, os ônibus urbanos elétricos foram introduzidos de forma gradual, com apoio de financiamento estatal e metas anuais de conversão de frota. A cidade é frequentemente citada como referência em planejamento urbano voltado à sustentabilidade e ao bem-estar (GEELS et al., 2018).

Na Alemanha, Berlim e Hamburgo também estão à frente da mobilidade limpa, com planos ambiciosos de eletrificação total da frota de ônibus até o fim da década. A Deutsche Bahn, responsável por grande parte do transporte ferroviário no país, já opera com eletricidade proveniente de fontes renováveis em várias regiões, o que fortalece a cadeia de descarbonização em nível nacional (GERMANWATCH, 2021).

Nos Estados Unidos, cidades como Los Angeles e Nova York têm investido fortemente na modernização de suas frotas, com ênfase na eletrificação. Los Angeles estabeleceu que, até 2030, todos os ônibus da LA Metro serão elétricos. O plano inclui não só a compra de veículos, mas também a construção de uma rede de infraestrutura de carregamento e a formação de profissionais para manutenção e operação. Segundo a California Air Resources Board (CARB, 2022), esses investimentos contribuem diretamente para os objetivos climáticos do estado e ajudam a reduzir disparidades socioambientais em comunidades historicamente expostas à poluição.

Outro caso inspirador é o de Vancouver, no Canadá, que utiliza energia elétrica 100% renovável em seu sistema de transporte ferroviário urbano (SkyTrain) e está expandindo gradualmente sua frota de ônibus elétricos. O plano de transição da cidade está inserido em uma estratégia maior de neutralidade de carbono até 2050 e tem apoio de políticas de precificação de carbono e incentivos à inovação tecnológica (CITY OF VANCOUVER, 2022).

Esses casos ilustram que, apesar das diferentes realidades econômicas e políticas, existem elementos comuns nas experiências bem-sucedidas:

- Comprometimento político de longo prazo
- Modelos de financiamento inovadores (público, privado e parcerias)
- Planejamento urbano integrado com metas climáticas
- Participação ativa da sociedade civil
- Adoção de tecnologias limpas adaptadas ao contexto local

Além disso, a troca de experiências entre cidades e o acesso a redes internacionais, como o C40 Cities, ICLEI e UITP, têm permitido que boas práticas sejam replicadas e adaptadas de acordo com as especificidades locais. Como apontam Santos e Barbosa (2021), a transição energética no transporte público não é uma fórmula única, mas sim um processo contínuo de aprendizado, adaptação e inovação.

No contexto brasileiro, essas referências internacionais podem servir como base para políticas mais consistentes e ousadas. Ainda que o país enfrente restrições fiscais e institucionais, há um enorme potencial



para avançar, especialmente em cidades médias, onde intervenções de menor escala podem ter grande impacto.

3 TECNOLOGIAS E COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS

3.1 ELETRIFICAÇÃO DA FROTA: ÔNIBUS ELÉTRICOS E INFRAESTRUTURA DE RECARGA

A eletrificação da frota de transporte público tem se consolidado como uma das estratégias mais eficazes para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e promover a transição energética no setor de mobilidade urbana. Os ônibus elétricos, por não emitirem poluentes locais durante a operação, contribuem significativamente para a melhoria da qualidade do ar e para a mitigação das mudanças climáticas, especialmente em grandes centros urbanos.

Segundo a International Energy Agency (IEA, 2022), a substituição de veículos movidos a diesel por ônibus elétricos pode reduzir em mais de 70% as emissões de CO₂ por quilômetro rodado, considerando-se uma matriz elétrica de baixo carbono. No Brasil, que possui uma matriz energética relativamente limpa, baseada em fontes renováveis como hidrelétricas e energia solar, esse potencial é ainda maior (EPE, 2023).

Contudo, a eletrificação da frota enfrenta desafios técnicos e logísticos importantes, principalmente no que diz respeito à infraestrutura de recarga. A instalação de eletropostos adequados, tanto nos terminais quanto nos pontos estratégicos ao longo das rotas, é essencial para garantir a autonomia e a eficiência dos veículos. Existem dois principais modelos de recarga: a recarga lenta, geralmente realizada durante a noite nos depósitos, e a recarga rápida, feita em terminais ou pontos de parada de maior permanência (SANTOS et al., 2020).

A escolha do tipo de recarga depende do modelo operacional da cidade, da autonomia dos veículos e da frequência das viagens. Segundo Lima e Pavan (2022), a infraestrutura deve ser planejada de forma integrada, considerando aspectos como a demanda energética, a rede elétrica disponível e o custo da energia. Além disso, é necessário o desenvolvimento de sistemas inteligentes de gestão de carregamento para evitar sobrecargas na rede elétrica e garantir o uso eficiente da energia.

Outro ponto importante é o custo inicial dos ônibus elétricos, que ainda é superior ao dos veículos convencionais a diesel. No entanto, diversos estudos apontam que o custo total de operação (TCO – Total Cost of Ownership) tende a ser mais baixo ao longo do tempo, devido à economia com combustível, manutenção e maior vida útil dos componentes elétricos (REZENDE et al., 2021). Políticas públicas de incentivo, como subsídios diretos, isenção de impostos e linhas de financiamento específicas, são fundamentais para viabilizar a adoção em larga escala.

Experiências internacionais e nacionais mostram que a eletrificação da frota, embora desafiadora, é viável quando apoiada por planejamento técnico, políticas públicas estruturadas e parcerias entre setor

público e privado. A eletrificação representa não apenas uma mudança tecnológica, mas um passo estratégico para cidades mais sustentáveis, saudáveis e resilientes.

3.2 USO DE BIOCOMBUSTÍVEIS E HIDROGÊNIO COMO ALTERNATIVAS SUSTENTÁVEIS

A busca por alternativas aos combustíveis fósseis no transporte público tem ampliado o interesse em fontes renováveis como os biocombustíveis e o hidrogênio verde. Ambas as opções são consideradas estratégias complementares à eletrificação, especialmente em países como o Brasil, onde há abundância de matéria-prima e know-how técnico para produção local de combustíveis limpos.

Os biocombustíveis, em especial o biodiesel e o biometano, já são utilizados de forma crescente em frotas urbanas e rodoviárias. De acordo com *Maciel et al.* (2016), o biodiesel pode ser incorporado à matriz energética do transporte público sem grandes alterações na infraestrutura, pois pode ser utilizado em motores a diesel com poucas adaptações, especialmente nas misturas B10 a B100. Além disso, estudos mostram que o biodiesel reduz consideravelmente as emissões de material particulado e gases como CO, HC e SO₂, o que traz benefícios diretos à saúde urbana.

Outro combustível promissor é o biometano, derivado da decomposição anaeróbica de resíduos orgânicos e esgoto. Conforme *Almeida, Santos e Silva* (2021), esse combustível apresenta grande potencial de integração com sistemas de transporte público, além de alinhar-se aos princípios da economia circular, ao transformar resíduos em energia útil. Cidades como São Paulo e Curitiba já realizaram testes com ônibus movidos a biometano, com desempenho satisfatório em termos de autonomia e redução de emissões.

Já o hidrogênio verde, produzido a partir da eletrólise da água com uso de energia renovável, tem ganhado relevância como vetor energético de longo prazo. Embora ainda apresente custos elevados, o hidrogênio se destaca por sua versatilidade e pelas emissões zero no ponto de uso. Em veículos com célula a combustível, o subproduto da reação é apenas vapor d'água. De acordo com *Santos et al.* (2022), o hidrogênio tem potencial para complementar a eletrificação, principalmente em linhas de ônibus de longa distância ou com alta demanda, onde a autonomia e o tempo de recarga são fatores críticos.

A utilização dessas tecnologias, contudo, depende de políticas públicas de incentivo, investimento em infraestrutura e parcerias com o setor privado. Segundo *Grillo e Gorini* (2021), a regulamentação do uso de combustíveis alternativos e a criação de linhas de crédito específicas são essenciais para viabilizar economicamente a transição energética em sistemas de transporte coletivo.

Portanto, tanto os biocombustíveis quanto o hidrogênio representam caminhos possíveis e complementares rumo a um transporte público mais limpo, eficiente e conectado com as metas climáticas globais e nacionais. A combinação dessas soluções pode ser particularmente eficaz no Brasil, dada sua matriz energética favorável e capacidade técnica instalada.

3.3 INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS PARA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E REDUÇÃO DE CUSTOS OPERACIONAIS

A incorporação de inovações tecnológicas no transporte público tem desempenhado papel central na busca por maior eficiência energética e redução de custos operacionais. Em um cenário de transição energética e pressão por sustentabilidade, a modernização dos sistemas de transporte não se limita à troca de combustíveis, mas envolve também otimização de processos, uso de dados em tempo real, tecnologias embarcadas e modelos inteligentes de gestão de frota.

Uma das principais tendências é o uso de sistemas de telemetria e análise de dados para monitorar o desempenho dos veículos em tempo real. Esses sistemas permitem acompanhar o consumo de energia, o padrão de condução dos motoristas, as condições do trajeto e o desgaste de componentes. Segundo *Andrade, Merschmann e Oliveira* (2020), a gestão de frotas com base em dados tem possibilitado reduções significativas no consumo de combustível e nos custos de manutenção, além de melhorar a eficiência operacional.

Outro avanço importante é o uso de tecnologias de regeneração de energia em veículos elétricos e híbridos. Por meio do sistema de frenagem regenerativa, a energia cinética gerada nas frenagens é convertida em eletricidade e armazenada na bateria do veículo, aumentando a autonomia e reduzindo o consumo energético total (GONÇALVES et al., 2019). Esse tipo de tecnologia é cada vez mais comum em ônibus elétricos e trens urbanos.

O uso de inteligência artificial (IA) e machine learning também tem revolucionado o planejamento de rotas e horários. Softwares inteligentes conseguem prever padrões de demanda e otimizar trajetos com base em variáveis como clima, fluxo de passageiros e trânsito. Segundo *Gomes e Lucena* (2021), essas ferramentas contribuem para a alocação eficiente dos veículos e para a diminuição de viagens ociosas, otimizando o uso da energia e reduzindo o custo por passageiro transportado.

Além disso, sistemas de bilhetagem eletrônica integrada e o uso de plataformas digitais de mobilidade (como aplicativos de tempo real e pagamento por QR code) têm reduzido custos operacionais relacionados à cobrança manual, aumentando a agilidade do embarque e a satisfação dos usuários. Esses sistemas também geram dados valiosos para a gestão do transporte, permitindo ajustes rápidos e eficazes.

A adoção de materiais mais leves e resistentes na fabricação de veículos, como ligas metálicas especiais e polímeros reforçados, também tem contribuído para o ganho de eficiência energética. Veículos mais leves exigem menos energia para se locomover, o que reflete diretamente nos custos operacionais, principalmente no transporte elétrico (MENEZES et al., 2022).

Portanto, as inovações tecnológicas no transporte público vão além da sustentabilidade ambiental: elas representam uma estratégia para aumentar a competitividade dos sistemas, melhorar o serviço prestado e garantir viabilidade econômica em médio e longo prazo.



4 DESAFIOS DA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA NOS TRANSPORTES PÚBLICOS

A transição energética no transporte público urbano enfrenta desafios estruturais significativos no Brasil, que vão desde limitações orçamentárias até entraves regulatórios e tecnológicos. Embora as soluções sustentáveis estejam disponíveis no mercado, sua implementação em larga escala ainda é limitada por uma série de barreiras interdependentes que exigem respostas coordenadas.

Entre os principais obstáculos estão os custos de aquisição e operação de tecnologias limpas, como ônibus elétricos ou movidos a biocombustíveis avançados. Conforme aponta *Pereira (2020)*, muitos municípios enfrentam dificuldades para manter os serviços atuais, o que inviabiliza a renovação da frota com tecnologias mais caras, mesmo que elas ofereçam menor custo operacional no longo prazo. A fragilidade fiscal das prefeituras e a ausência de mecanismos financeiros específicos dificultam a modernização dos sistemas.

Adicionalmente, há dificuldades regulatórias e institucionais. *Gonzaga et al. (2020)* destacam que o marco regulatório brasileiro para o transporte público ainda é pouco claro quanto à exigência de metas ambientais e incentivos à adoção de tecnologias limpas. A falta de articulação entre os entes federativos e a descontinuidade das políticas públicas comprometem a execução de projetos estruturantes voltados à mobilidade sustentável.

No aspecto técnico, as cidades brasileiras enfrentam infraestruturas urbanas defasadas, com redes elétricas que nem sempre suportam a demanda de carregamento de veículos elétricos em grande escala, além da falta de mão de obra especializada. *Vasconcellos (2013)* observa que a configuração dispersa e desigual das cidades brasileiras agrava esses desafios, exigindo intervenções que considerem também a reorganização territorial e a integração entre mobilidade e urbanismo.

Portanto, para que a transição energética nos transportes públicos ocorra de forma eficaz, é necessário enfrentar essas limitações com uma abordagem sistêmica, que inclua planejamento urbano, investimento público, capacitação técnica e compromisso político de longo prazo.

5 POLÍTICAS PÚBLICAS E MODELOS DE FINANCIAMENTO

A superação dos desafios da transição energética no transporte coletivo depende diretamente da construção de políticas públicas integradas e mecanismos de financiamento adequados. No cenário nacional, ainda são incipientes os incentivos diretos à eletrificação de frotas e ao uso de combustíveis alternativos, apesar do potencial técnico e ambiental dessas soluções.

Ribeiro (2019) argumenta que políticas de incentivo à bioenergia e aos biocombustíveis avançados, como o biodiesel e o biometano, já mostraram resultados positivos em setores como o agrícola e o industrial, mas ainda são pouco exploradas no transporte urbano. A extensão desses incentivos à mobilidade urbana,



por meio de subsídios fiscais e linhas de crédito verdes, poderia impulsionar a adoção de tecnologias sustentáveis por parte dos operadores.

Outro instrumento promissor são as parcerias público-privadas (PPPs). Braga e Ferreira (2017) analisam o caso do metrô de Salvador como exemplo de como investimentos estruturais em transporte podem ser viabilizados por meio da cooperação entre governo e setor privado. Essas parcerias, se bem estruturadas, podem oferecer escala, inovação e agilidade à modernização dos sistemas de transporte, desde que acompanhadas de contratos claros, metas de sustentabilidade e fiscalização eficiente.

No entanto, essas iniciativas só alcançarão seu pleno potencial se estiverem articuladas com o planejamento urbano. Como destacam Buckeridge et al. (2020), a integração entre transporte, habitação e uso do solo é crucial para garantir que a infraestrutura sustentável seja utilizada de forma eficaz. Cidades compactas, conectadas por transporte coletivo limpo e apoiadas por políticas de adensamento inteligente, favorecem não apenas a eficiência energética, mas também a inclusão social e a qualidade de vida urbana.

Logo, é imprescindível que o Estado assuma um papel coordenador, capaz de alinhar interesses públicos e privados em torno de uma agenda de mobilidade urbana sustentável. A combinação de incentivos econômicos, segurança regulatória e planejamento territorial integrado forma o tripé necessário para viabilizar a transição energética nos transportes públicos de maneira efetiva e equitativa.

6 ESTUDOS DE CASO E BOAS PRÁTICAS

A adoção de tecnologias sustentáveis no transporte público tem gerado experiências relevantes ao redor do mundo, que funcionam como referência para cidades que buscam avançar na transição energética. Essas boas práticas demonstram que, com planejamento, financiamento estruturado e políticas públicas consistentes, é possível superar obstáculos técnicos, econômicos e regulatórios, além de promover uma mobilidade urbana mais limpa e eficiente.

A cidade chinesa de Shenzhen é frequentemente citada como o principal exemplo de sucesso na eletrificação da frota de ônibus. Desde 2017, opera com 100% de veículos elétricos no transporte coletivo. Esse resultado foi alcançado por meio de forte investimento público, subsídios diretos à aquisição de veículos e infraestrutura, além da integração com empresas locais de tecnologia. Segundo Zhang et al. (2019), a cidade reduziu significativamente as emissões de gases de efeito estufa e melhorou a qualidade do ar urbano, mesmo com o aumento da demanda por transporte. Outro caso de destaque é Bogotá, na Colômbia, que reestruturou parte do sistema TransMilenio para incluir centenas de ônibus elétricos. Com apoio de financiamento internacional, a cidade conseguiu estabelecer contratos que priorizam eficiência energética e metas ambientais claras, conforme apontado pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP, 2021).



No Brasil, a cidade de São Paulo implementou metas legais para redução de emissões no transporte coletivo, com base na Lei 16.802/2018. O objetivo é substituir gradualmente a frota movida a diesel por veículos elétricos ou que utilizem combustíveis limpos, como o biometano. Até 2024, mais de 200 ônibus elétricos já estavam em circulação, operados por empresas privadas que firmaram contratos de desempenho com a prefeitura. Essa experiência reforça a viabilidade de transições graduais, apoiadas por legislação local, fiscalização ambiental e parcerias com fabricantes como Eletra e BYD.

Em paralelo à adoção de novas tecnologias, os modelos de financiamento e operação sustentável têm evoluído para permitir a viabilização econômica desses projetos. Em Bogotá, a estrutura contratual foi redesenhada: as empresas responsáveis pela operação dos ônibus não precisam mais ser proprietárias dos veículos, que são fornecidos por empresas especializadas em eletrificação urbana. Segundo o Banco Mundial (2022), esse modelo reduz os riscos financeiros e permite maior escala e velocidade na adoção de tecnologias sustentáveis. Cidades europeias como Londres e Amsterdam também adotam estratégias combinadas, com financiamento via fundos verdes, metas ambientais vinculadas ao orçamento público e cobrança de taxas urbanas para desestimular o uso de automóveis particulares.

As lições aprendidas nesses contextos são convergentes. Primeiro, é fundamental o planejamento de longo prazo, com metas progressivas de substituição da frota e integração com a rede elétrica e o uso do solo. Em segundo lugar, os contratos públicos devem ser reestruturados para valorizar desempenho ambiental, e não apenas critérios de menor preço. Por fim, é necessário promover capacitação técnica local, fomentar a produção nacional de equipamentos e ampliar os mecanismos de participação social no desenho das soluções.

Em suma, os estudos de caso revelam que não há um único modelo ideal, mas sim diferentes caminhos possíveis, adaptados ao contexto político, econômico e urbano de cada cidade. O que todos têm em comum é a articulação entre tecnologia, políticas públicas e financiamento estratégico — elementos essenciais para transformar o transporte coletivo em um motor de sustentabilidade urbana.

7 CONCLUSÃO

A transição energética no transporte público urbano não é apenas uma resposta à crise climática — é uma oportunidade histórica para repensar o papel da mobilidade nas cidades e promover um novo modelo de desenvolvimento urbano. A urgência em reduzir as emissões de gases de efeito estufa e em combater os efeitos das mudanças climáticas coloca o setor de transportes no centro das estratégias de sustentabilidade. Contudo, essa transformação precisa ir além da simples substituição de combustíveis: ela exige uma abordagem sistêmica, que envolva o redesenho das políticas públicas, o fortalecimento da governança urbana e a valorização da equidade social.



O Brasil, com sua matriz energética majoritariamente renovável, seu parque industrial diversificado e sua expertise em biocombustíveis, reúne condições técnicas e ambientais únicas para liderar a transição energética na América Latina. Ao contrário de muitos países que dependem fortemente de combustíveis fósseis importados, o Brasil já possui uma base favorável para integrar eletrificação, biocombustíveis avançados e fontes alternativas como o biometano e o hidrogênio verde ao transporte coletivo.

Ainda assim, os desafios são significativos. As barreiras econômicas continuam a ser um dos maiores entraves à modernização da frota. O custo inicial de veículos elétricos, da infraestrutura de recarga e da adaptação das garagens e terminais ainda está acima da capacidade de investimento de muitos municípios. Para superar esse obstáculo, é necessário ampliar o acesso a linhas de financiamento verde, criar fundos públicos voltados à mobilidade sustentável e atrair investimentos privados por meio de parcerias bem estruturadas, com garantias regulatórias e incentivos de longo prazo.

As barreiras regulatórias e institucionais também merecem atenção. Muitos contratos de concessão do transporte público ainda não incluem cláusulas relacionadas à redução de emissões, desempenho ambiental ou eficiência energética. A revisão desses contratos e a inclusão de métricas ambientais são passos essenciais para alinhar os operadores ao novo paradigma da mobilidade limpa. Além disso, a falta de articulação entre os níveis federal, estadual e municipal fragiliza a implementação de políticas estruturantes. A criação de consórcios intermunicipais e câmaras técnicas regionais pode favorecer a padronização de normas, o compartilhamento de tecnologias e a racionalização de recursos.

As limitações técnicas não são menos relevantes. A transição energética exige capacitação contínua de operadores, técnicos e gestores públicos. É necessário investir em centros de formação especializados, integrar universidades ao desenvolvimento de soluções tecnológicas e fomentar a produção nacional de equipamentos, como baterias, motores e painéis solares. A criação de uma cadeia industrial verde pode, inclusive, gerar empregos qualificados e impulsionar a inovação no país.

Além disso, a transição energética deve estar alinhada ao planejamento urbano integrado. Não basta mudar a tecnologia dos ônibus se as cidades continuarem baseadas na lógica do espraiamento urbano, da prioridade ao automóvel e da exclusão das periferias. A experiência de cidades como Shenzhen, Bogotá, Santiago e São Paulo demonstra que o sucesso depende da integração entre mobilidade, habitação, uso do solo e políticas sociais. Cidades compactas, densas e bem servidas por transporte coletivo de qualidade são mais eficientes, inclusivas e sustentáveis.

Outro ponto fundamental é o compromisso político de longo prazo. A descontinuidade das políticas públicas é um dos principais fatores de insucesso em projetos de mobilidade sustentável. Mudanças de governo não podem significar a paralisação de investimentos em infraestrutura limpa ou o retrocesso de marcos legais conquistados com base em evidências científicas e participação social. A transição energética



deve ser tratada como uma política de Estado, com metas claras, indicadores de desempenho e monitoramento permanente.

É igualmente importante garantir que a modernização do transporte público seja feita com justiça social e climática. As populações mais vulneráveis são as que mais sofrem com o transporte precário, com os efeitos da poluição e com a exclusão dos centros urbanos. Uma transição energética bem conduzida deve priorizar essas populações, levando ônibus limpos e eficientes às periferias, reduzindo o tempo de deslocamento, melhorando a qualidade do ar e ampliando o acesso ao emprego, à educação e à saúde. O transporte público não deve ser apenas sustentável, mas também acessível, seguro, confortável e digno.

Além disso, as mudanças culturais precisam acompanhar as inovações tecnológicas. A sociedade precisa reconhecer o valor do transporte público como um bem coletivo essencial para o funcionamento da cidade. Campanhas educativas, incentivo ao uso do transporte coletivo, políticas de desincentivo ao uso do carro individual e valorização dos profissionais do setor são estratégias importantes para criar uma cultura de mobilidade sustentável.

A implementação da transição energética pode, ainda, fortalecer o papel das cidades brasileiras em redes internacionais de inovação climática, como o C40 Cities, ICLEI e o Pacto Global de Prefeitos pelo Clima. A troca de experiências, a cooperação técnica e o acesso a fundos internacionais para ações climáticas são oportunidades que devem ser aproveitadas de forma estratégica.

Por fim, é importante destacar que o sucesso da transição energética no transporte público não será medido apenas pela quantidade de ônibus elétricos nas ruas, mas pela capacidade das cidades de oferecer um sistema de mobilidade que respeite o meio ambiente, valorize as pessoas e promova um futuro urbano sustentável. A construção desse futuro exige coragem política, visão estratégica e compromisso com o bem comum.

Mais do que trocar motores a diesel por baterias, é preciso redefinir o papel do transporte público na construção de cidades mais justas, resilientes e preparadas para o futuro. Trata-se de uma escolha entre manter um modelo excludente e insustentável ou construir, de forma colaborativa e inovadora, uma mobilidade que respeite o planeta e as pessoas. A transição energética é, acima de tudo, um caminho para transformar as cidades em espaços mais humanos, equilibrados e comprometidos com as próximas gerações.

REFERÊNCIAS

- Almeida, M. C.; Santos, R. S.; Silva, L. M. Potencial do biometano como combustível para o transporte coletivo urbano no Brasil. *Revista Gestão e Projetos*, v. 12, n. 2, p. 45-60, 2021.
- Andrade, C. S.; Merschmann, L. H. C.; Oliveira, F. A. A tecnologia de gestão de frotas e a redução de custos operacionais no transporte urbano. *Revista de Administração e Inovação*, v. 17, n. 3, p. 212-226, 2020.
- Banco Mundial. Bogotá electrifies its bus fleet with support from international financing. Washington, DC: World Bank, 2022.
- Braga, F. R.; Ferreira, J. A. Parcerias público-privadas e transporte urbano: o caso do metrô de Salvador. *Revista de Administração Pública*, v. 51, n. 5, p. 769-789, 2017.
- Buckeridge, M. S. et al. Ciência e inovação para sustentabilidade: desafios da mobilidade urbana. *Estudos Avançados*, v. 34, n. 99, p. 189–204, 2020.
- C40 Cities. Oslo: Zero Emission Public Transport. Disponível em: <https://www.c40.org>. Acesso em: 22 mar. 2025.
- CARB – California Air Resources Board. Zero-Emission Transit Fleet Regulation. Sacramento, 2022.
- Cervero, R.; Sullivan, C. Transit-oriented development's role in reducing greenhouse gas emissions. *Urban Climate*, v. 1, n. 1, p. 1-17, 2011.
- CEPAL – Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe. Electromovilidad en América Latina y el Caribe: hoja de ruta. Santiago: CEPAL, 2021.
- City of Vancouver. Climate Emergency Action Plan 2022. Vancouver, 2022.
- Geels, F. W. et al. The dynamics of low-carbon transitions: a multi-level perspective. *Energy Research & Social Science*, v. 30, p. 44–52, 2018.
- Gomes, R. F.; Lucena, R. S. Inteligência artificial na gestão da mobilidade urbana: aplicações e desafios. *Revista Brasileira de Gestão Urbana*, v. 13, n. 1, p. 105-122, 2021.
- Gonçalves, F. F. et al. Eficiência energética em sistemas de transporte elétrico urbano: o papel da frenagem regenerativa. *Revista Engenharia e Tecnologia Aplicada*, v. 8, n. 2, p. 44-55, 2019.
- Gonzaga, G. A. et al. Políticas públicas para o transporte público urbano no Brasil: entraves institucionais e desafios regulatórios. *Revista de Direito Público*, v. 55, n. 3, p. 145-168, 2020.
- Grillo, F.; Gorini, A. P. Biocombustíveis e transição energética: desafios regulatórios e oportunidades para o Brasil. *Revista de Administração e Inovação*, v. 18, n. 3, p. 205-221, 2021.
- Guimarães, L.; Ribeiro, S. K. A transição energética e a mobilidade urbana sustentável: desafios para o Brasil. *Revista Transportes*, v. 28, n. 1, p. 1-14, 2020.
- IEA – International Energy Agency. Transport sector CO₂ emissions trends and drivers. Paris: IEA, 2022.



IPCC. Sixth Assessment Report – Climate Change 2023: Synthesis Report. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023.

Maciel, M. R. W. et al. Avaliação do uso de biodiesel como alternativa sustentável para transporte público. *Revista de Administração de Empresas*, v. 56, n. 2, p. 134-145, 2016.

Magrini, A. et al. Sustentabilidade e mobilidade urbana: governança e políticas públicas. *Revista Brasileira de Gestão Urbana*, v. 13, n. 3, p. 75-89, 2021.

Menezes, A. F. et al. Aplicação de materiais leves em veículos de transporte coletivo: implicações na eficiência energética. *Revista Produção e Desenvolvimento*, v. 8, n. 4, p. 38-49, 2022.

Ministério do Meio Ambiente (MMA). Relatório de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil. Brasília: MMA, 2022.

Moura, R.; Silva, C. G. Governança e inovação no transporte coletivo: oportunidades e barreiras à transição energética. *Revista Brasileira de Gestão Urbana*, v. 11, p. 1-17, 2019.

Oliveira, F. N. et al. Transporte coletivo e planejamento urbano: perspectivas para cidades sustentáveis. *Cadernos Metrôpole*, v. 22, n. 48, p. 359-376, 2020.

Pereira, R. H. M. et al. Mobilidade urbana e qualidade do transporte público nas cidades brasileiras. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), Nota Técnica n. 69, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br>.

Rezende, L. et al. Ônibus elétricos no Brasil: potencial, desafios e perspectivas. *Caderno de Mobilidade Sustentável*, Instituto Clima e Sociedade, 2021.

Ribeiro, S. T. C. Biocombustíveis e políticas públicas de energia: o caso brasileiro. *Revista Brasileira de Energia*, v. 25, n. 1, p. 93-107, 2019.

Santos, A. C.; Barbosa, E. M. Aprendizados internacionais para a eletromobilidade no transporte público brasileiro. *Revista Brasileira de Planejamento e Políticas Públicas*, v. 12, n. 2, p. 79-95, 2021.

Santos, F. A. R. et al. Hidrogênio verde como vetor de transição energética no setor de transportes: possibilidades e limitações. *Revista Produção Online*, v. 22, n. 4, p. 1045-1062, 2022.

Silva, J. L.; Lima, M. E. Políticas públicas e eletrificação do transporte coletivo no Brasil. *Revista Planejamento e Políticas Públicas*, v. 45, p. 1-20, 2021.

Silva, M. G. et al. Poluição do ar e saúde pública: o impacto das emissões veiculares em áreas urbanas. *Revista de Saúde Pública*, v. 55, n. 4, p. 1-9, 2021.

UNEP – United Nations Environment Programme. Electric Mobility in Latin America: Bogota Case Study. Nairobi, 2021.

Vasconcellos, E. A. Mobilidade urbana: espaço, tempo e controle social. São Paulo: Annablume, 2013.

World Bank. Financing Clean Urban Transport: Lessons from Bogotá. Washington, DC: World Bank, 2022.



WRI – World Resources Institute. How Did Shenzhen, China Build the World’s Largest Electric Bus Fleet? Washington, DC: WRI, 2020.

Zhang, X. et al. Electric buses in China: Progress and challenges. Energy Policy, v. 132, p. 51-61, 2019.