Do Individual Ao Compartilhado: Mobilidade Sob Demanda Para Um Futuro Verde

From Individual to Shared: On-Demand Mobility for a Green Future

Victor Hugo Souza de Abreu, Doutor em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Rio de Janeiro - Programa de Engenharia de Transportes - PET, COPPE-UFRJ

victor@pet.coppe.ufrj.br

Rafael Ferraz dos Santos, Mestrando em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Rio de Janeiro - Programa de Engenharia de Transportes - PET, COPPE-UFRJ

rafael.ferraz@pet.coppe.ufrj.br

Andrea Souza Santos, Doutora em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Rio de Janeiro - Programa de Engenharia de Transportes - PET, COPPE-UFRJ

andrea.santos@pet.coppe.ufrj.br

Resumo

O artigo discute a crescente necessidade de reestruturar a mobilidade urbana diante do aumento populacional e da limitação das infraestruturas convencionais. Com base em uma revisão bibliográfica sistematizada, este estudo tem como objetivo investigar a Mobilidade sob Demanda (MoD) como uma estratégia central para alcançar uma mobilidade urbana mais sustentável. A metodologia utilizada envolveu a análise crítica de publicações nacionais e internacionais que abordam os aspectos ambientais, sociais e econômicos da MoD. O cerne da discussão está na constatação de que, ao permitir o compartilhamento de veículos e otimizar recursos urbanos, a MoD pode reduzir emissões de gases de efeito estufa, poluentes atmosféricos e a demanda por espaço urbano, além de favorecer a inclusão social e a multimodalidade. Por fim, o artigo sugere direções para pesquisas futuras, ressaltando a importância do aprimoramento tecnológico, do planejamento intermodal e da formulação de políticas públicas voltadas à ampliação da acessibilidade e à equidade na mobilidade urbana.

Palavras-chave: Mobilidade Urbana; Mobilidade sob Demanda; Sustentabilidade; Transporte Urbano; Compartilhamento de Veículos; e Multimodalidade.

Abstract

The article discusses the growing need to restructure urban mobility in response to population growth and the limitations of conventional infrastructure. Based on a systematized literature review, this study aims to investigate On-Demand Mobility (MoD) as a central strategy for achieving more sustainable urban mobility. The methodology involved a critical analysis of national and international publications addressing the environmental, social, and economic aspects of MoD. The core of the discussion lies in the observation that, by enabling vehicle sharing and optimizing urban resources, MoD can reduce greenhouse gas emissions, air pollutants, and demand for urban space, while also promoting social inclusion and multimodality. Finally, the article suggests directions for future research, highlighting the importance of technological advancement, intermodal planning, and the development of public policies aimed at expanding accessibility and equity in urban mobility.

Keywords: *Urban Mobility; On-Demand Mobility; Sustainability; Urban Transport; Vehicle Sharing; and Multimodality.*

1. Introdução

À medida em que se tornam maiores e mais populosas e nelas são estabelecidas novas tendências de urbanização, as cidades são desafiadas a manter os serviços e a infraestrutura necessários para acompanhar as demandas crescentes de transporte (REBSAMEN *et al.*, 2012; SPIESER *et al.*, 2014; DIA & JAVANSHOUR, 2017) ao mesmo tempo que realizam uma tentativa de resolver, ou pelo menos minimizar, problemas urgentes no nexo de sustentabilidade e eficiência (NAHMIAS-BIRAN *et al.*, 2020). Os veículos privados mudaram drasticamente o paradigma da mobilidade urbana pessoal no Século XX (PAVONE *et al.*, 2012), permitindo viagens entre pontos de origem e destino mais rápidas e a qualquer hora dentro das cidades (ZHANG *et al.*, 2015). Entretanto, esses meios de transportes aparecem como uma solução insustentável para o futuro da mobilidade urbana (FIEDLER *et al.*, 2017).

Isso acontece devido a fatores tais como disponibilidade limitada de estradas adicionais e de vagas de estacionamento nas cidades (MITCHELL *et al.*, 2010; FIEDLER *et al.*, 2017), bem como as preocupações com a sustentabilidade desse modelo de transporte (ZHANG *et al.*, 2015), que ocasiona dependência do petróleo, produção de gases de efeito estufa pelo tubo de escape, congestionamentos diários, acidentes de tráfego, etc. (PAVONE, 2015; CHEN & CASSANDRAS, 2020). Todos esses problemas influenciam negativamente a qualidade de vida humana e impactam o meio ambiente (HAMURCU & EREN, 2020). Dessa forma, a reestruturação da mobilidade urbana continua sendo um dos maiores desafios enfrentados pelos formuladores de políticas em todo o mundo, isso porque seguir as tendências da mobilidade convencional com ênfase na construção de novas infraestruturas para responder ao aumento da demanda de veículos provou ao longo dos anos ser ineficaz (DIA & JAVANSHOUR, 2017).

A crescente urbanização e os desafios impostos pelas infraestruturas convencionais exigem inovações tecnológicas que impulsionem sistemas de transporte mais eficientes e soluções potencialmente transformadoras e sustentáveis (SPIESER *et al.*, 2014; SANTOS *et al.*, 2021). Tais inovações devem não apenas aumentar a rentabilidade e a flexibilidade dos serviços de transporte (ATASOY *et al.*, 2015), mas também superar as limitações estruturais dos ambientes urbanos, onde estradas e estacionamentos possuem capacidade restrita e, em sua maioria, fixa (SALAZAR *et al.*, 2018).

Nesse contexto, a Mobilidade sob Demanda (do inglês, *Mobility-on-Demand* – MoD) tem se destacado como uma das estratégias mais promissoras para a mobilidade pessoal em áreas urbanas. Seu crescimento acelerado é impulsionado pelos avanços tecnológicos e pela digitalização dos serviços de transporte, permitindo maior eficiência no uso dos recursos urbanos e na alocação dinâmica da oferta e demanda de viagens (ZHANG *et al.*, 2015; PAVONE, 2015; SALAZAR *et al.*, 2018; SHAHEEN & COHEN, 2020). Além de mitigar congestionamentos e reduzir impactos ambientais, a MoD favorece uma mobilidade mais inclusiva e acessível, promovendo um redesenho da dinâmica urbana e um uso mais inteligente da infraestrutura existente. Diante desse cenário, este estudo tem como objetivo investigar a Mobilidade sob Demanda como uma estratégia central para alcançar uma mobilidade urbana sustentável, analisando seus impactos ambientais, sociais e econômicos e seu potencial para transformar os padrões tradicionais de deslocamento.

2. Metodologia

Este artigo adota abordagem fundamentada em uma revisão de literatura abrangente, com o intuito de reunir e analisar criticamente contribuições acadêmicas relevantes sobre a Mobilidade sob Demanda (MoD). Foram selecionados estudos publicados em periódicos científicos nacionais e internacionais, bem como relatórios técnicos e documentos institucionais, priorizando publicações dos últimos quinze anos. A seleção das fontes considerou critérios de relevância temática, rigor metodológico e diversidade de perspectivas (ambiental, social e econômica). A análise foi conduzida de forma interpretativa, visando identificar os principais benefícios, limitações e desafios da MoD, além de oportunidades para sua integração às políticas de mobilidade urbana sustentável. O levantamento permitiu a estruturação dos argumentos ao longo do texto e ofereceu subsídios para as reflexões apresentadas nas considerações finais.

3. Mobilidade Sob Demanda Como Estratégia Sustentável

A MoD consiste em frota compartilhada de veículos que são disponibilizados a um ou mais passageiros conforme a necessidade da viagem, a qualquer hora do dia (MITCHELL *et al.*, 2010) por meio de: (a) compartilhamento contínuo de um determinado número de veículos em uma frota; ou (b) múltiplos usuários compartilhando um único veículo (CHEN & CASSANDRAS, 2020). Já existem sinais iniciais significativos de que a importância da propriedade de automóveis particulares está diminuindo e a mobilidade compartilhada/colaborativa está aumentando (LIYANAGE *et al.*, 2019).

O Sistema de MoD, quando gerenciado de maneira eficiente, tem potencial para minimizar diversos problemas urbanos tais como dependência do petróleo, poluição ambiental, congestionamentos, acidentes de tráfego e necessidade de expansão de estacionamentos (ZHANG *et al.*, 2015; FIEDLER *et al.*, 2017). O uso de veículos elétricos para sistemas de MoD é uma solução ainda mais atraente, não apenas para futuros serviços de mobilidade privada, mas também para reduzir ainda mais as emissões de gases de efeito estufa que causam uma poluição drástica no meio ambiente (AMMOUS *et al.*, 2018) que acarreta o aquecimento global e as mudanças climáticas. Um fator de diferença fundamental dos sistemas de MoD, quando comparados aos modos de transporte existentes, é a capacidade de resposta à demanda, como tal, ele promete ser um sistema sustentável e acessível para mobilidade pessoal de forma densa (MARCZUK *et al.*, 2015). Além disso, financeiramente, o compartilhamento de veículos distribui o custo de compra, manutenção e seguro de veículos por uma grande base de usuários, aproveitando economias de escala para reduzir o custo de mobilidade pessoal (SPIESER *et al.*, 2014).

Portanto, os sistemas de MoD têm sido defendidos como um passo fundamental para a mobilidade urbana pessoal sustentável no Século XXI (MITCHELL *et al.*, 2010) ao utilizar a infraestrutura existente, que é insuficiente e extremamente difícil de expandir, de forma mais eficiente (FIEDLER *et al.*, 2017; SALAZAR *et al.*, 2018). Nesse sentido, servindo ao propósito de discutir sobre essa nova solução de transporte, este artigo busca realizar um apanhado geral sobre a incorporação da Mobilidade sob Demanda na cidade como estratégia sustentável, destacando suas principais potencialidades.

Uma solução para os problemas urbanos decorrentes dos transportes vem de perceber que a maioria dos veículos utilizados em ambientes urbanos são subutilizados (PAVONE *et al.*, 2012; PAVONE, 2015) e uma redução geral de veículos em uma rede de transporte, quando gerenciado de forma eficiente, implica uma redução no congestionamento, consumo de energia e efeitos ambientais adversos (CHEN & CASSANDRAS, 2020). Nesse contexto, tem-se como

solução os sistemas de MoD que tem chamado a atenção atualmente como um passo fundamental para a mobilidade urbana pessoal sustentável (Mitchell *et al.*, 2010) para aumentar a utilização de veículos (vários passageiros compartilham o mesmo veículo) e promover o uso sustentável do solo urbano (ZHANG *et al.*, 2016).

Com a mobilidade oferecida como serviço, os consumidores do futuro terão a flexibilidade de escolher a melhor solução para um propósito específico de viagem, sendo mais seletivos na escolha dos serviços de mobilidade porta a porta oferecidos por operadores de mobilidade para soluções de viagens (LIYANAGE *et al.*, 2019). O compartilhamento de veículos acarreta benefícios aos três âmbitos do desenvolvimento sustentável (social, econômico e ambiental) (PAVONE, 2015), conforme benefícios apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Benefícios ao desenvolvimento sustentável da promoção da mobilidade sob demanda.

Benefício	Descrição
Menores emissões de GEE	Ao permitir o compartilhamento de veículos, a mobilidade sob demanda reduz a necessidade de cada indivíduo possuir um veículo individual. Isso resulta em menos veículos nas estradas, o que leva a uma diminuição significativa nas emissões GEE, contribuindo para a mitigação da mudança climática (MARCZUK *et al.*, 2015).
Menores emissões de Poluentes Atmosféricos	Ao incentivar o compartilhamento de veículos e o uso mais eficiente dos recursos, a mobilidade sob demanda diminui a quantidade de veículos nas ruas, resultando em menor poluição do ar. Além disso, a adoção de veículos mais novos e eficientes em termos de combustível, incluindo veículos elétricos, contribui para a redução das emissões de poluentes atmosféricos, garantindo uma melhoria significativa na qualidade do ar e na saúde pública (MARCZUK *et al.*, 2015).
Uso mais eficiente dos recursos	A mobilidade sob demanda incentiva o aproveitamento máximo dos recursos existentes, como automóveis, bicicletas e scooters, por meio do compartilhamento. Isso reduz a necessidade de fabricar novos veículos, o que implica menor consumo de energia, matéria-prima e água durante o processo de produção (SANTOS *et al.*, 2021).
Menor demanda por espaço urbano	Ao promover o compartilhamento de veículos, a mobilidade sob demanda ajuda a diminuir a quantidade de espaço necessário para estacionamento. Isso libera áreas urbanas que poderiam ser utilizadas para outras finalidades, como parques, ciclovias e espaços verdes, contribuindo para um ambiente urbano mais agradável e sustentável (FIEDLER CAP & CERTICKY, 2017).
Estímulo à multimodalidade	A mobilidade sob demanda frequentemente integra diferentes modos de transporte, como carros, bicicletas, ônibus e transporte público. Isso incentiva as pessoas a combinar diferentes meios de locomoção de acordo com suas necessidades, tornando os deslocamentos mais eficientes e reduzindo o uso desnecessário de veículos particulares (SALAZAR *et al.*, 2019).
Acesso ampliado à mobilidade	A mobilidade sob demanda pode fornecer soluções de transporte acessíveis e flexíveis, especialmente para comunidades com pouco acesso a opções de locomoção. Isso pode melhorar a inclusão social e econômica, permitindo que mais pessoas tenham acesso a empregos, educação, serviços de saúde e outras oportunidades (DE ASSIS *et al.*, 2022).
Redução do congestionamento urbano	Com o compartilhamento de veículos e a integração de diferentes modos de transporte, a mobilidade sob demanda tem o potencial de diminuir o número de veículos privados nas ruas e, consequentemente, reduzir o congestionamento do tráfego (SANTOS *et al.*, 2021). Isso melhora a fluidez do trânsito, diminui o tempo gasto em engarrafamentos e aumenta a eficiência do sistema de transporte como um todo. Passageiros com destinos próximos

Benefício	Descrição
	ou na mesma direção podem ainda compartilhar um passeio e dividir as tarifas, possibilitando o transporte de mais passageiros com menos veículos (GUO & XU, 2020).
Estímulo à economia colaborativa	A mobilidade sob demanda é um exemplo da economia colaborativa, em que os recursos são compartilhados entre os usuários. Esse modelo promove a sustentabilidade ao incentivar o uso compartilhado de veículos e a redução do consumo excessivo, além de proporcionar oportunidades econômicas para os provedores de serviços de mobilidade e para os indivíduos que compartilham seus próprios veículos (SANTOS *et al.*, 2021).

Conforme abordado na Tabela 1, nota-se que a MoD desempenha um papel fundamental na construção de cidades verdes ao reduzir a dependência de veículos particulares e otimizar o uso dos recursos urbanos. Ao permitir o compartilhamento de veículos e integrar diferentes modais de transporte, a MoD contribui para a diminuição do congestionamento e da poluição atmosférica, fatores essenciais para melhorar a qualidade de vida nas áreas urbanas. Além disso, ao incentivar o uso racional da infraestrutura viária, a MoD reduz a necessidade de ampliação de vias e estacionamentos, liberando espaços que podem ser convertidos em áreas verdes e ciclovias, promovendo cidades mais sustentáveis e resilientes.

Outro aspecto relevante da MoD é sua capacidade de impulsionar a transição para matrizes energéticas mais limpas. Com a eletrificação da frota e a digitalização dos serviços de transporte, torna-se possível reduzir significativamente as emissões de gases de efeito estufa e a pegada de carbono associada ao transporte urbano. A integração de soluções como veículos autônomos e inteligência artificial na gestão de frotas compartilhadas também possibilita uma operação mais eficiente, otimizando rotas e reduzindo o consumo energético. Dessa forma, a MoD não apenas melhora a eficiência do transporte, mas também contribui diretamente para o cumprimento de metas ambientais e climáticas estabelecidas por cidades que buscam um desenvolvimento urbano mais sustentável.

Além dos benefícios ambientais, a MoD favorece a inclusão social e a acessibilidade, elementos essenciais para a construção de cidades verdes e equitativas. A oferta de transporte sob demanda pode suprir lacunas deixadas pelos sistemas tradicionais de transporte público, especialmente em regiões periféricas e de difícil acesso, garantindo que mais pessoas possam se deslocar de forma eficiente e sustentável. Ao democratizar o acesso à mobilidade e reduzir a necessidade de posse de um veículo particular, a MoD promove um modelo urbano mais integrado, sustentável e alinhado aos princípios das cidades inteligentes e ecológicas do futuro.

É crucial destacar ainda que a mobilidade sob demanda pode maximizar seus benefícios ao incorporar veículos elétricos, que oferecem um impacto ambiental e qualidade de vida superiores devido à sua emissão zero de poluentes (AMMOUS *et al.*, 2018). Além disso, os veículos autônomos representam outra tecnologia de destaque, pois permitem uma direção mais inteligente e eficiente, reduzindo congestionamentos e otimizando o uso das vias (PAVONE, 2015; DIA & JAVANSHOUR, 2017). Essas inovações complementam a mobilidade sob demanda, impulsionando ainda mais a sustentabilidade, a eficiência energética e a melhoria geral dos sistemas de transporte.

4. Ampliando As Estratégias De Mobilidade Sob Demanda

Cabe ainda destacar que a Mobilidade Flexível sob Demanda (do inglês, *Flexible Mobility on Demand* - FMoD) tem se tornado cada vez mais atraente como uma alternativa sustentável

e economicamente viável aos serviços convencionais de transporte público, como os ônibus, que operam em rotas e horários fixos. Esse modelo tradicional, embora essencial para a mobilidade urbana, enfrenta desafios significativos, como baixa taxa de ocupação fora dos horários de pico, custos operacionais elevados e uma capacidade limitada de adaptação às variações dinâmicas da demanda. Além disso, a previsibilidade dos horários e itinerários fixos pode torná-lo menos competitivo em relação a opções mais flexíveis, como os veículos particulares e os serviços de transporte sob demanda, que oferecem maior comodidade e personalização da viagem.

A FMoD se destaca justamente por superar essas limitações ao integrar avanços tecnológicos, como algoritmos de roteamento inteligente, análise de dados em tempo real e plataformas digitais para a intermediação entre oferta e demanda. Essa abordagem permite a otimização das viagens, reduzindo tempos de espera, melhorando a taxa de ocupação dos veículos e tornando o transporte mais eficiente em termos de custos e emissões. Além disso, a FMoD pode desempenhar um papel fundamental na promoção da intermodalidade, conectando usuários a outros meios de transporte, como metrôs e trens, e preenchendo lacunas em áreas com menor cobertura do transporte público convencional.

Outro aspecto relevante é seu potencial para promover a inclusão social, ao atender comunidades com menor acesso a meios de transporte tradicionais e oferecer soluções mais acessíveis para idosos, pessoas com mobilidade reduzida e populações de baixa renda. Ao reduzir a necessidade de posse de um veículo particular, a FMoD também contribui para a mitigação dos impactos ambientais, a diminuição da dependência de combustíveis fósseis e a melhor utilização do espaço urbano, reduzindo congestionamentos e a necessidade de infraestrutura dedicada ao estacionamento. Dessa forma, a FMoD representa uma solução inovadora que não apenas complementa os sistemas de transporte existentes, mas também impulsiona uma transformação na mobilidade urbana, tornando-a mais eficiente, sustentável e adaptada às necessidades contemporâneas da sociedade (LIYANAGE *et al.*, 2019).

Ademais, o transporte público, quando fornecido para a demanda do horário de pico, pode resultar em baixa eficiência, pois os veículos ficam ociosos fora do horário de pico (Marczuk *et al.*, 2015). Nos FMoD, os usuários recebem um menu otimizado de opções em tempo real a partir do qual fazem uma seleção com base em suas preferências. A natureza flexível do FMoD visa melhorar a sustentabilidade dos sistemas de transporte, maximizando simultaneamente a conveniência para os passageiros e a lucratividade para os operadores (ATASOY *et al.*, 2015), fornecendo flexibilidade no tempo e no espaço (WEN *et al.*, 2019). O princípio fundamental de um esquema de FMoD bem-sucedido são serviços compartilhados, confiabilidade, disponibilidade, acessibilidade e sob demanda. Além disso, os FMoD devem ser flexíveis em termos de escolha de rota, alocação de veículos e tipo de pagamento (LIYANAGE *et al.*, 2019).

Salienta-se ainda que formas flexíveis de transporte interessam aos passageiros (demanda) e aos operadores de transporte (oferta) por vários motivos, tais como: (i) os serviços de transporte público, por exemplo, possuem rotas e horários fixos e podem ter baixa frequência em determinados horários do dia ou em algumas partes da rede de transporte (ATASOY *et al.*, 2015); (ii) embora os serviços de rota fixa sejam econômicos em áreas urbanas, eles se tornam menos eficazes em áreas de baixa densidade (ATASOY *et al.*, 2015), dessa forma, é economicamente ineficiente para as operadoras de transporte fornecerem maior frequência ou melhor cobertura nessas áreas (GOODWILL *et al.*, 2008).

Tendo em vista a necessidade de novas soluções de transporte que atendam às necessidades crescentes de mobilidade urbana sem exigir a construção de novas infraestruturas de

transportes, este artigo teve como objetivo realizar uma extensiva revisão da literatura que buscou identificar os aspectos chave que tornam a Mobilidade sob Demanda uma importante estratégia sustentável para minimizar os impactos dos veículos privados nas cidades. Nesse sentido, nota-se que a Mobilidade sob Demanda tem elevado potencial, quando gerenciado de forma eficiente, para reduzir a subutilização de veículos, a dependência do petróleo, a poluição ambiental, os congestionamentos, os acidentes de tráfego e a necessidade de expansão de rodovias e estacionamentos.

Entretanto, torna-se necessário minimizar a desvantagem da utilização desse tipo de serviço que consiste nos desequilíbrios de veículos em estações de compartilhamento. Isso porque nos sistemas unilaterais os usuários deslocam-se de um local para outro, sem precisar voltar novamente para o lugar de origem posteriormente e a natureza de padrões dinâmicos de demanda espaço-temporal faz com que algumas estações fiquem rapidamente sem veículos, enquanto outras fiquem com muitos. Dessa forma, faz-se necessário um melhor planejamento e operação desses sistemas de compartilhamento de veículos por meio da utilização da otimização computacional que permita que haja um re-balanceamento ou um pré-posicionamento de veículos ociosos em todas as regiões com demanda desigual. Além disso, o uso de veículos autônomos pode se reequilibrar e otimizar o rendimento geral pela coordenação entre demanda e oferta.

5. Maximizando Os Benefícios Da Mobilidade Sob Demanda

Para maximizar os benefícios da Mobilidade sob Demanda e reduzir os desafios, faz-se necessário realizar mais estudos sobre a temática levando em consideração os pontos destacados na Tabela 2. Ao explorar essas direções, pesquisas futuras poderão contribuir para a formulação de estratégias mais eficazes e sustentáveis, promovendo uma mobilidade urbana mais eficiente e acessível.

Tabela 2. Concentração de esforços em pesquisa sobre a Mobilidade sob Demanda.

Desafios	Como minimizá-los
Modelagem e simulação da demanda	Estudos que analisem o comportamento dos usuários, padrões de deslocamento e previsões de demanda para otimizar a distribuição de veículos e reduzir desequilíbrios nas estações de compartilhamento.
Integração da MoD com outros modais	Investigações sobre a complementaridade entre a MoD e o transporte público tradicional, incluindo a implementação de sistemas intermodais que reduzam a dependência de veículos particulares.
Impactos ambientais e energéticos	Avaliação da eficiência energética da MoD e seu impacto na redução de emissões de gases de efeito estufa, considerando a transição para veículos elétricos e energias renováveis.
Desafios econômicos e regulatórios	Análise de modelos de financiamento e governança, bem como políticas regulatórias que possam incentivar a adoção da MoD e garantir sua viabilidade econômica.
Aceitação social e percepção dos usuários	Estudos qualitativos sobre a aceitação da MoD pela população, identificando barreiras comportamentais e estratégias para aumentar a confiança dos usuários nesse modelo de transporte.
Automação e novas tecnologias	Pesquisa sobre o potencial dos sistemas Autônomos de Mobilidade sob Demanda (AMoD), avaliando desafios técnicos, éticos e operacionais para sua implementação em larga escala.
Acessibilidade e inclusão social	Investigações sobre como a MoD pode atender melhor grupos vulneráveis, como idosos, pessoas com deficiência e comunidades de baixa renda, garantindo um acesso equitativo ao transporte.

Análise de impactos urbanos	Estudos sobre como a MoD pode influenciar o planejamento urbano, incluindo o uso do solo, a redução da necessidade de estacionamentos e a reconfiguração dos espaços urbanos para priorizar a mobilidade ativa.

6. Considerações Finais

Os resultados deste estudo oferecem aos planejadores urbanos e formuladores de políticas uma base sólida para compreender os fatores que justificam a implantação da Mobilidade sob Demanda (MoD) como uma estratégia sustentável. Além disso, destacam a necessidade de atenção especial ao desequilíbrio de demanda em estações de compartilhamento, um desafio crítico para garantir a eficiência e acessibilidade desse modelo de transporte. A adoção bem-sucedida da MoD requer não apenas a otimização do uso dos veículos, mas também o desenvolvimento de políticas públicas que equilibrem oferta e demanda, evitando problemas como a escassez de veículos em determinadas áreas e o excesso em outras.

Entre as limitações deste estudo, destaca-se o fato de ter sido considerado apenas um dos desafios para a promoção da MoD, sem abordar outras questões igualmente relevantes. Aspectos como um possível aumento da distância percorrida devido à necessidade de reposicionamento de veículos, impactos no tempo de espera dos usuários, barreiras regulatórias e tecnológicas para a implantação de veículos autônomos (no caso de sistemas Autônomos de Mobilidade sob Demanda – AMoD), além de limitações orçamentárias para investimentos em infraestrutura e tecnologia, permanecem como lacunas a serem exploradas em pesquisas futuras.

Dada a complexidade e os múltiplos fatores que influenciam a implementação da MoD, torna-se essencial o aprofundamento de estudos que investiguem como diferentes partes interessadas – incluindo agências públicas nos níveis local, regional, estadual e federal, empresas privadas, organizações não governamentais, instituições acadêmicas e consumidores – podem colaborar de forma eficaz para impulsionar o crescimento sustentável desse modelo. Pesquisas futuras podem ainda se concentrar em estratégias de integração com o transporte público, análise da aceitação social, avaliação de custos-benefícios em diferentes escalas urbanas, além do desenvolvimento de modelos de operação baseados em inteligência artificial e veículos elétricos. Tais esforços são essenciais para consolidar a MoD como uma solução robusta para a mobilidade urbana do futuro, alicerçada nos princípios da sustentabilidade, da equidade e da inovação tecnológica.

Referências

Ammous, M. et al. Optimal cloud-based routing with in-route charging of mobility-on-demand electric vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, v. 20, n. 7, p. 2510-2522, 2018. DOI: 10.1109/tits.2018.2867519.

Atasoy, B. et al. The concept and impact analysis of a flexible mobility on demand system. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 56, p. 373-392, 2015. DOI: 10.1016/j.trc.2015.04.009.

Chen, R.; Cassandras, C. G. Optimal assignments in mobility-on-demand systems using event-driven receding horizon control. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, v. 23, n. 3, p. 1969-1983, 2020.

De Assis, T. F. et al. Sustainable transport indicators and mitigation actions applied to the Green Bond Principles. In: Carbon footprints of manufacturing and transportation industries. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022. p. 139-169. DOI: 10.1007/978-981-19-7226-3_6.

Dia, H.; Javanshour, F. Autonomous shared mobility-on-demand: Melbourne pilot simulation study. *Transportation Research Procedia*, v. 22, p. 285-296, 2017. DOI: 10.1016/j.trpro.2017.03.035.

Fiedler, D.; Čáp, M.; Čertický, M. Impact of mobility-on-demand on traffic congestion: Simulation-based study. In: IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2017. Proceedings [...]. IEEE, 2017. p. 1-6. DOI: 10.1109/itsc.2017.8317830.

Goodwill, J. A. et al. Creative ways to manage paratransit costs. Tampa: National Center for Transit Research, 2008. Disponível em: https://www.nctr.usf.edu/pdf/77606.pdf. Acesso em: 4 abr. 2025.

Guo, G.; Xu, Y. A deep reinforcement learning approach to ride-sharing vehicle dispatching in autonomous mobility-on-demand systems. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, v. 14, n. 1, p. 128-140, 2020. DOI: 10.1109/MITS.2019.2962159.

Hamurcu, M.; Eren, T. Electric bus selection with multicriteria decision analysis for green transportation. *Sustainability*, v. 12, n. 7, p. 2777, 2020. DOI: 10.3390/su12072777.

Liyanage, S. et al. Flexible mobility on-demand: An environmental scan. *Sustainability*, v. 11, n. 5, p. 1262, 2019. DOI: 10.3390/su11051262.

Marczuk, K. A. et al. Autonomous mobility on demand in simmobility: Case study of the central business district in Singapore. In: 2015 IEEE 7th International Conference on Cybernetics and Intelligent Systems (CIS) and IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM). IEEE, 2015. p. 167-172. DOI: 10.1109/iccis.2015.7274567.

Mitchell, W. J.; Borroni-Bird, C. E.; Burns, L. D. *Reinventing the automobile: personal urban mobility for the 21st century*. Cambridge: MIT Press, 2010.

Nahmias-Biran, B. et al. Evaluating the impacts of shared automated mobility on-demand services: An activity-based accessibility approach. *Transportation*, v. 48, p. 1613-1638, 2021.

Pavone, M. Autonomous mobility-on-demand systems for future urban mobility. In: Maurer, M. et al. (org.). *Autonomes Fahren: technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015. p. 399-416. DOI: 10.1007/978-3-662-45854-9_19.

Pavone, M. et al. Robotic load balancing for mobility-on-demand systems. *The International Journal of Robotics Research*, v. 31, n. 7, p. 839-854, 2012. DOI: 10.1177/0278364912444766.

Rebsamen, B. et al. Utilizing the infrastructure to assist autonomous vehicles in a mobility on demand context. In: TENCON 2012 IEEE Region 10 Conference. IEEE, 2012. p. 1-5. DOI: 10.1109/tencon.2012.6412285.

Salazar, M. et al. Intermodal autonomous mobility-on-demand. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, v. 21, n. 9, p. 3946-3960, 2019.

Salazar, M. et al. On the interaction between autonomous mobility-on-demand and public transportation systems. In: 2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). IEEE, 2018. p. 2262-2269. DOI: 10.1109/itsc.2018.8569381.

Santos, A. S. et al. An overview on costs of shifting to sustainable road transport: A challenge for cities worldwide. In: Carbon footprint case studies: municipal solid waste management, sustainable road transport and carbon sequestration. Singapore: Springer, 2021. p. 93-121. DOI: 10.1007/978-981-15-9577-6_4.

Shaheen, S.; Cohen, A. Mobility on demand in the United States: From operational concepts and definitions to early pilot projects and future automation. In: Meyer, G.; Beiker, S. (org.). *Disrupting mobility*. Cham: Springer, 2020. p. 55-68. DOI: 10.1007/978-3-030-35032-1_14.

Spieser, K. et al. Toward a systematic approach to the design and evaluation of automated mobility-on-demand systems: A case study in Singapore. In: Meyer, G.; Beiker, S. (org.). *Road vehicle automation*. Cham: Springer, 2014. p. 229-245. DOI: 10.1007/978-3-319-05990-7_20.

Wen, J.; Nassir, N.; Zhao, J. Value of demand information in autonomous mobility-on-demand systems. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 121, p. 346-359, 2019. DOI: 10.1016/j.tra.2019.01.018.

Zhang, R.; Rossi, F.; Pavone, M. Model predictive control of autonomous mobility-on-demand systems. In: 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2016. p. 1382-1389. DOI: 10.1109/icra.2016.7487272.

Zhang, R. et al. Models, algorithms, and evaluation for autonomous mobility-on-demand systems. In: 2015 American Control Conference (ACC). IEEE, 2015. p. 2573-2587. DOI: 10.1109/acc.2015.717.