Universidade do Minho
Escola de Economia, Gestão e Ciência Política

Cristiana Fontinha Baptista

Sustentabilidade do *last-mile*: Uma revisão sistemática de literatura sobre soluções de entrega e os seus impactos ambientais

abril de 2026

Sustentabilidade e *last-mile*: Uma revisão sistemática de literatura sobre soluções de entrega e os seus impactos ambientais

Cristiana Fontinha Baptista

UMinho | 2026

Universidade do Minho
Escola de Economia, Gestão e Ciência Política

Cristiana Fontinha Baptista

Sustentabilidade do *last-mile*: Uma revisão sistemática de literatura sobre soluções de entrega e os seus impactos ambientais

Dissertação de Mestrado
Mestrado em Gestão
Especialização em Logística

Trabalho realizado sob a orientação do
Professor Doutor José António Almeida Crispim

abril de 2026

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição-NãoComercial-SemDerivações
CC BY-NC-ND

https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/

AGRADECIMENTOS

Porque nenhum caminho se constrói sozinho, antes de encerrar esta jornada, resta-me agradecer a todas as pessoas que, cada uma à sua maneira, contribuíram para o sucesso deste trabalho. Sou imensamente grata pela força e apoio que me deram, e que, juntamente com todo o esforço e tempo dedicados, foram cruciais para a concretização desta dissertação.

A mim, pela determinação e dedicação, mesmo quando predominavam as dúvidas e o sentimento de que não seria capaz.

Ao meu orientador, por ter aceitado orientar-me neste trabalho e pela disponibilidade e acompanhamento oferecidos.

A toda a minha família, pelo apoio demonstrado e pela confiança em mim depositada, em especial aos meus avós, pelo carinho e pela preocupação demonstrados.

Às minhas amigas, Mariana, Beatriz e Elza, pelo incentivo, pelas palavras de conforto e pela boa disposição nos momentos de incerteza, não só nesta etapa do meu percurso, como nas restantes; ainda, às minhas colegas de mestrado e amigas, Bruna, Juliana e Rosa, pelo incentivo e apoio mútuo neste caminho que partilhamos, e por todos os momentos que vivemos juntas durante todo o percurso.

Aos meus pais. Ao meu pai, o meu pilar, por tudo. Pela paciência, pelo amor e por, independentemente das circunstâncias, estar sempre presente em todos os momentos, e acreditar em mim, tornando este percurso possível. À minha mãe (*in memoriam*) que, em vida, foi o maior exemplo de força e resiliência e que, mesmo à distância de um infinito, me deu a força necessária para me superar e a esperança de que seria capaz. Que este último lugar nos meus agradecimentos reflita o primeiro lugar que ocupam no meu coração.

A todos vós, o meu muito obrigada.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

DECLARAÇÃO DE USO DE FERRAMENTAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL (IA)

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri a qualquer forma de utilização indevida de ferramentas de Inteligência Artificial (IA), nem à falsificação ou omissão de informações, fontes, dados, resultados ou processos em nenhuma das etapas conducentes à sua elaboração.

Declaro ainda que qualquer utilização de ferramentas de IA foi feita de forma transparente e responsável, encontrando-se devidamente assinalada/descrita no trabalho, e que procedi à verificação crítica da exatidão do conteúdo produzido com o seu apoio, assumindo integralmente a responsabilidade pelo que submeto.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho, bem como as normas aplicáveis de integridade académica e de proteção de dados.

Sustentabilidade do last-mile: Uma revisão sistemática de literatura sobre soluções de entrega e os seus impactos ambientais

RESUMO

Com o crescimento do *e-commerce* e, consequentemente, o aumento do número de encomendas, a última milha, ou *last-mile*, que é das etapas mais dispendiosas da logística urbana, tem-se tornado cada vez mais crítica. Além disso, esta fase das entregas é também dos processos mais poluentes. Como tal, com uma sociedade que, por um lado procura entregas mais rápidas, mas, por outro, é cada vez mais consciente dos problemas ambientais, é crucial a procura por soluções de última milha mais eficientes e sustentáveis.

Através de uma revisão sistemática de literatura, realizada com base nas diretrizes PRISMA, esta dissertação analisou 33 artigos, publicados entre 2020 e 2025 e retirados da base de dados *ScienceDirect*, com o objetivo de identificar quais as principais alternativas de entrega abordadas na literatura existente. De forma a compreender quais as soluções de entrega de *last-mile* mais sustentáveis, do ponto de vista ambiental, os estudos analisados foram agrupados em seis categorias.

Os resultados indicam que a micromobilidade elétrica oferece os benefícios ambientais mais consistentes, ainda que para curtas distâncias. Além disso, o uso de outros veículos elétricos e os sistemas de entrega multinível, também, se revelaram opções benéficas, apesar de dependerem de fatores como as fontes de energia e a coordenação entre níveis, respetivamente. Quanto às estratégias colaborativas os resultados sugerem que, dependendo do modo de transporte utilizado e da necessidade de desvios adicionais, o seu desempenho pode ser variável. Adicionalmente, o uso de tecnologias autónomas revelou-se uma alternativa promissora, enquanto outras estratégias como o uso de cacifos e de mecanismos de consolidação podem ter, também, um contributo positivo para a sustentabilidade da última milha.

Assim, conclui-se que a eficácia, do ponto de vista ambiental, das diferentes alternativas de entrega depende do contexto urbano em que as mesmas são implementadas.

Palavras-chave: Impacto Ambiental; Last-Mile; Logística Urbana; Revisão Sistemática; Sustentabilidade

Last-mile sustainability: A systematic literature review on delivery solutions and their environmental impacts

ABSTRACT

Given the rise of e-commerce and, consequently, the increase of number of orders, the last-mile, one of the most expensive stages of urban logistics, has evolved into a pressing issue. Furthermore, this delivering phase is also one of the most environmentally harmful. Accordingly, within the context of a society that, on the one hand demands quicker deliveries and, on the other hand is increasingly aware of environmental problems, it is crucial to seek for last-mile solutions which are more efficient and sustainable.

Through a systematic literature review, based on PRISMA directives, this dissertation analysed 33 articles, published between 2020 and 2025 which were drawn from *ScienceDirect* data base, with the aim of identifying the main delivering alternatives found on available literature. In order to better understand the most sustainable last-mile delivering solutions, from an environmental point of view, the analysed studies were organized in six categories.

The results show that electric micromobility has ecological benefits which are more consistent, despite favouring shorter distances. Additionally, the use of electric vehicles and multilevel delivery systems also proved to be favourable options, although they depend on factors such as energy sources and coordination between levels, respectively. In regard to the collaborative strategies, results suggest that its performance may vary, depending on the means of transportation employed and the need of additional detours. Moreover, the exploitation of independent technologies transpired to be a promising alternative, whereas other strategies including the use of lockers and mechanisms of consolidation may also be a valuable contribution to the last-mile's sustainability.

Therefore, we reach the conclusion that the effectiveness of different delivering alternatives, from an ecological perspective, depends on the urban context in which they are implemented.

Keywords: Environmental Impact; Last-Mile; Urban Logistics; Systematic Review; Sustainability

ÍNDICE

Direitos de autor e condições de utilização do trabalho por terceiros ii
Agradecimentos iii
Declaração de integridade e Declaração de uso de ferramentas de Inteligência Artificial iv
Resumo v
Abstract vi
Lista de siglas e símbolos ix
Lista de figuras x
Lista de tabelas xi
1. Introdução 1
1.1. Enquadramento e relevância do tema 1
1.2. Questões de investigação e objetivos 2
1.3. Estrutura da dissertação 3
2. Revisão de literatura 4
2.1. Logística urbana e *last-mile delivery* 4
2.1.1. Logística urbana 4
2.1.2. *Last-mile delivery* 5
2.2. Sustentabilidade no *last-mile delivery* 6
2.3. Principais alternativas de entrega e soluções logísticas 7
2.3.1. Veículos sustentáveis de entrega 7
2.3.2. Modelos colaborativos de entrega 9
2.3.3. Centros de consolidação e *microhubs* urbanos 11
2.3.4. Soluções *self-service* 12
2.3.5. Tecnologias autónomas de entrega 13
2.4. Breve síntese da literatura 14
3. Metodologia 15
3.1. Critérios de inclusão e exclusão 15
3.2. Estratégia de pesquisa 17
3.3. Síntese, análise e organização dos dados 18
4. Resultados obtidos 20
4.1. Seleção dos estudos e fluxograma PRISMA 20
4.2. Caracterização dos estudos 21
4.3. Principais resultados dos estudos 27

4.3.1. Estudos que abordam modelos colaborativos 27
4.3.2. Estudos que abordam micromobilidade elétrica 28
4.3.3. Estudos que abordam veículos elétricos e tecnologias de frota 30
4.3.4. Estudos que abordam sistemas de entrega multinível 30
4.3.5. Estudos que abordam soluções com tecnologias autónomas 31
4.3.6. Estudos que abordam outras estratégias logísticas 32
4.4. Síntese dos principais resultados dos estudos 34
5. Discussão de resultados 36
5.1. Interpretação dos resultados obtidos 36
5.2. Comparação com a literatura existente 42
5.3. Limitações da evidência incluída 43
5.4. Limitações da revisão sistemática de literatura 43
5.5. Implicações e direções futuras de investigação 44
6. Conclusões 46
Referências bibliográficas 48
Apêndice I – Tabela de extração de dados 57
Apêndice II – Checklist de avaliação da qualidade 65

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

CO_2	Dióxido de Carbono
CO	Monóxido de Carbono
GEE	Gases com Efeito de Estufa
GWP	Global Warming Potential (Potencial de Aquecimento Global)
CH_4	Metano
N_2O	Óxido Nitroso
NO_x	Óxidos de Azoto
SO_2	Dióxido de Enxofre

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma PRISMA 20
Figura 2: Tipo de estudo dos artigos analisados 22
Figura 3: Ano de publicação dos artigos analisados 23
Figura 4: Fonte de publicação dos artigos analisados 24
Figura 5: Continente de origem dos artigos analisados 24
Figura 6: País de origem dos artigos analisados 25
Figura 7: Países estudados nos artigos analisados 26
Figura 8: Impactos ambientais estudados nos artigos analisados 26
Figura 9: Diagrama Sankey da framework baseada na estrutura CIMO 41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Categorização dos artigos analisados 21
Tabela 2: Síntese dos resultados dos estudos 35
Tabela 3: Síntese dos resultados segundo uma framework baseada na lógica CIMO 37
Tabela 4: Extração de dados dos artigos incluídos 57
Tabela 5: Checklist de avaliação da qualidade dos artigos analisados 65

1. Introdução

Este capítulo tem como objetivo enquadrar o tema em estudo no contexto atual, bem como mostrar a sua pertinência. Além disso, é neste capítulo que, também, são explicitadas as questões de investigação e objetivos da dissertação, bem como a sua estrutura.

1.1. Enquadramento e relevância do tema

Num mundo cada vez mais digital e onde as mudanças nos hábitos de consumo da sociedade são cada vez mais frequentes, o *e-commerce* tem ganho cada vez mais destaque, tendo como consequência um crescimento do número de encomendas e, portanto, do volume de entregas aos consumidores (Pereira Marcilio Nogueira et al., 2022; Schöder et al., 2016). Como tal, nesse contexto, os níveis de atividades de transporte em áreas urbanas têm, também, aumentado, resultado da necessidade de entregas com uma maior flexibilidade e rapidez (Nogueira et al., 2025; Pereira Marcilio Nogueira et al., 2022; Schöder et al., 2016). Além disso, também as preocupações com o meio ambiente são cada vez mais frequentes, quer por parte dos consumidores, quer por parte dos prestadores de serviços logísticos, pelo que, de forma a garantir eficiência e sustentabilidade ao nível das entregas, a procura por soluções adequadas de mobilidade sustentável tem sido cada vez algo mais regular e de grande interesse (Van Duin et al., 2026).

Assim, a relevância de abordar o *last-mile delivery*, que segundo Elsokkary et al. (2023) é a etapa que envolve mais custos e, também, a mais demorada, é instigada por diversos desafios e obstáculos, dos quais (Boysen et al., 2021; Ehrler et al., 2021): aumento da procura por serviços logísticos e do volume de encomendas, resultante do aumento da população nas cidades e do comércio eletrónico; sustentabilidade e consciencialização da sociedade, já que, apesar do maior número de encomendas que se traduz em externalidades negativas, os consumidores têm uma maior sensibilização ambiental; custos, uma vez que a etapa do *last-mile* é dispendiosa, envolvendo muitos gastos associados; e pressão para prazos de entrega mais curtos, resultante da necessidade de corresponder às expectativas dos clientes.

Sendo esta questão da logística de última milha crítica, explorar a mesma pode auxiliar os profissionais da área, na tomada de decisões relativas a estratégias e soluções de entregas de última milha que visem não só minimizar impactos ambientais, mas também reduzir custos e melhorar a eficiência das entregas e de todo o processo (Pourmohammadreza et al., 2025).

Portanto, esta dissertação procura contribuir para uma melhor compreensão da sustentabilidade do *last-mile*, reforçando os conhecimentos existentes acerca disso e identificando quais as abordagens e estratégias de entrega mais adequadas nesse sentido, do ponto de vista ambiental.

1.2. Questões de investigação e objetivos

Em relação às questões de investigação definidas, as mesmas são:

- Que alternativas de entrega têm sido propostas na literatura para tornar o *last-mile delivery* mais sustentável?

- Quais são os principais impactos ambientais dessas alternativas (emissões de dióxido de carbono e de outros gases com efeito de estufa, poluição sonora, consumo de combustível, etc.) associados ao *last-mile delivery* identificados na literatura existente?

Quanto ao principal objetivo da dissertação, o mesmo passa por realizar uma revisão sistemática de literatura de forma a identificar as alternativas que contribuem para a sustentabilidade das entregas de última milha, bem como os seus principais impactos, de âmbito ambiental.

Relativamente aos objetivos específicos, estes consistem em:

- Identificar e categorizar as diferentes alternativas de entrega, propostas na literatura para tornar o *last-mile* mais sustentável;

- Identificar e sintetizar os impactos ambientais associados a essas alternativas de entrega;

- Identificar lacunas e propor recomendações para futuras investigações;

- Oferecer indicações para organizações que pretendem apostar em soluções sustentáveis na logística de última milha e propor sugestões que promovam um *last-mile delivery* mais sustentável.

1.3. Estrutura da dissertação

Esta dissertação está organizada em da seguinte forma:

- No capítulo um está descrita a introdução, onde o tema de investigação é enquadrado e onde é apresentada a sua relevância, bem como as questões de investigação, os objetivos e a estrutura da dissertação;

- No capítulo dois é feita uma breve revisão de literatura acerca dos tópicos mais relevantes dentro do tema, onde são abordados os principais conceitos e as principais alternativas de entrega e soluções de última milha;

- No capítulo três é descrita a metodologia de investigação, onde estão expostos os critérios de inclusão e exclusão, além do modo como se procedeu à recolha de dados e à forma como estes foram avaliados e organizados;

- No capítulo quatro são analisados os estudos incluídos e apresentados os resultados obtidos, resultantes dessa análise;

- No capítulo cinco segue-se a discussão de resultados, onde é feita uma breve interpretação dos dados obtidos, comparando os mesmos com a literatura, e identificadas as principais limitações dos estudos analisados e da dissertação, bem como implicações para a prática e linhas futuras de investigação;

- No capítulo seis estão redigidas as principais conclusões do trabalho, bem como uma breve síntese geral do estudo;

- Seguidamente, está presente a lista de referências bibliográficas utilizadas;

- E, por fim, apresentam-se os apêndices, onde estão anexas a tabela de extração de dados e a *checklist* utilizada para avaliar a qualidade dos artigos analisados.

2. Revisão de Literatura

A finalidade deste capítulo é clarificar os principais conceitos relevantes para o tema em investigação, bem como as principais soluções e alternativas de *last-mile delivery* enumeradas na literatura existente.

2.1. Logística urbana e *last-mile delivery*

2.1.1. Logística urbana

De acordo com os autores Taniguchi et al. (2001), a logística urbana pode ser descrita como um processo que visa a otimização não apenas das atividades de transporte nas cidades, mas da totalidade das tarefas logísticas, executadas tanto por entidades públicas como privadas. Além disso, segundo os mesmos autores existem certos fatores que devem ser considerados nesse contexto, como é o caso da segurança, do congestionamento e do consumo e poupança de energia, no funcionamento do setor logístico (Taniguchi et al., 2001). Já Boysen et al. (2021) entendem por logística urbana todas as atividades logísticas que decorrem nas cidades, nas quais se inclui tanto o transporte de passageiros como o transporte de bens e mercadorias. Simplificando, a logística urbana é vista como a entrega ou a recolha, ou até mesmo ambas, de encomendas em áreas urbanas (Demir et al., 2022).

Desta forma, a noção de logística como sendo um sistema que consolida diferentes cargas e coordena atividades de transporte, surge para destacar a necessidade de uma perspetiva abrangente do transporte de carga em áreas urbanas (Crainic, 2008). Assim, este conceito tem vindo a evoluir, na medida em que, devido a diferentes fatores, como o aumento da população urbana, dos níveis de *e-commerce* e das preocupações com a sustentabilidade e com a rapidez e a eficiência das entregas, apresentados nos estudos de Cruz et al. (2024) e Kahalimoghadam et al. (2024), passou a integrar aspetos ambientais, sociais e económicos.

Como tal, de acordo com Demir et al. (2022) a logística urbana envolve práticas que promovem meios de transporte mais benéficos para o ambiente, serviços de entrega mais flexíveis, logística inversa, planeamento eficiente de rotas, entre outros.

Quanto aos principais objetivos da logística urbana, segundo Taniguchi et al. (2001), podemos destacar que otimizar os sistemas logísticos urbanos, enquanto o setor público procura reduzir impactos ambientais e sociais e o privado reduzir custos, é prioridade. Já para Crainic (2008) conciliar o apoio ao

desenvolvimento social e económico das cidades com a redução dos impactos resultantes ao transporte de carga é um dos focos da logística urbana.

Neste contexto, e com a necessidade de garantir que as operações urbanas se tornam mais eficientes e responsáveis ambientalmente falando, é dado um maior foco à logística urbana, em particular às entregas de última milha (Demir et al., 2022).

2.1.2. *Last-mile delivery*

Como já foi referido, tem havido um aumento das encomendas *online*, o que segundo Sangkhiew Pornsing (2018) se deve ao facto de ser algo conveniente para os consumidores, já que as empresas transportadoras oferecem diversas opções de entrega. Ora, é nesse contexto que aparece a noção de *last-mile delivery*, ou entregas de última milha, que, de acordo com os autores Boysen et al. (2021), se pode definir como sendo o conjunto de todas as operações logísticas associadas à entrega de encomendas, iniciando-se num ponto de partida onde é depositada a carga, a partir do qual decorrem etapas de transporte, até que no final as encomendas cheguem ao cliente final. Na verdade este conceito é comumente aceite na literatura, pelo que, também, com base em Demir et al. (2022) e Olsson et al. (2019) esta etapa das entregas é descrita como sendo aquela que trata das atividades de transporte necessárias que levam a carga até ao seu destino final, partindo de um centro de distribuição. No fundo, o *last-mile delivery*, trata-se do momento em que existe uma interação direta entre a transportadora que presta o serviço de entrega e o cliente final, o destinatário ao qual é entregue a encomenda (Bosona, 2020).

A logística de última milha é ainda caracterizada como o planeamento, implementação e controlo do transporte e armazenamento, desde o ponto de partida até ao ponto de entrega final (Olsson et al., 2019).

Além disso, esta fase final da entrega, é vista como sendo das partes mais complexas, ineficazes e dispendiosas de uma cadeia de abastecimento, como referem Silva et al. (2023), Demir et al. (2022), Sxoinaraki e Panou (2017) e Pourmohammadreza et al. (2025), sendo que as causas que levam a isso podem ser ambientais, como o baixo desempenho ao nível ambiental, económicas, como os custos associados, por exemplo, a falhas nas entregas e, até, sociais (Silva et al., 2023; Sxoinaraki & Panou, 2017).

No entanto, segundo Shuaibu et al. (2025), existem diversos obstáculos que podem comprometer as entregas de última milha e a sua respetiva eficiência, nomeadamente: elevados custos operacionais, associados ao transporte; dificuldades na integração de novas soluções tecnológicas; pressão causada pelas exigências dos clientes; agravamento do congestionamento e dos níveis de poluição e da pegada de carbono, devido ao maior número de entregas; e limitações ao nível das infraestruturas.

A verdade é que com o tempo têm surgido várias abordagens em relação a esta questão, tal como mencionam os autores Silva et al. (2023) e Bosona (2020). Silva et al. (2023), que referem que existem três tipos possíveis de soluções para melhorar esta etapa, sendo elas soluções para veículos, soluções operacionais e soluções organizacionais. Por sua vez, Boysen et al. (2021), apesar de ainda considerarem a abordagem mais tradicional de última milha, em que um estafeta se dirige de carrinha até ao destinatário, abordam, também, novas soluções, como é o caso das entregas em dois níveis, com *microhubs* e bicicletas de carga, e dos serviços de recolha de encomendas *self-service*. No entanto, os mesmos autores mencionam outras alternativas que, se mostram promissoras para o futuro do *last-mile delivery*, como o uso robôs autónomos, drones e *crowdshipping* (Boysen et al., 2021).

Apesar de todas essas soluções, que têm surgido de forma a tornar esta etapa da logística urbana mais sustentável, é evidente que a última milha continua a ser uma fase crítica para a sustentabilidade, pelo que procurar compreender de forma mais aprofundada a logística de última milha é essencial para melhorar ao nível dos seus impactos ambientais, sociais e económicos (Olsson et al., 2019).

2.2. Sustentabilidade no *last-mile delivery*

Desta forma, tendo em conta as exigências por parte do consumidor, como entregas mais rápidas, janelas horárias mais flexíveis e alternativas de pontos de recolha, bem como a preocupação perante questões ambientais das empresas transportadoras e de outras entidades públicas e privadas, a logística urbana pode relacionar-se diretamente com a sustentabilidade, que, segundo Shuaibu et al. (2025), é uma das principais questões ligadas às atividades de última milha. Assim, em resposta à atenção dada, por parte da sociedade, aos diferentes impactos ambientais e, além disso, a assuntos de âmbito social, surge o conceito de sustentabilidade (Diaz Gonçalves & Saporiti Machado, 2023). Segundo

o Relatório Bruntland das Nações Unidas (1987) publicado pela World Commission on Environmental and Development, entende-se por sustentabilidade a capacidade de satisfazer as necessidades presentes sem, no entanto, colocar em risco a satisfação das necessidades futuras, garantindo, assim, que as próximas gerações mantenham essa capacidade (UN. Secretary-General & World Commission on Environment and Development, 1987).

Contudo, a noção de sustentabilidade foi evoluindo e percebeu-se que não só a vertente ambiental deveria ser considerada, mas também a social e a económica, pelo que foi introduzida a noção de tripé da sustentabilidade, ou *triple bottom line*, por John Elkington, tendo, também as Nações Unidas reafirmado essa abordagem, com a integração desses três pilares (Alhaddi, 2015; United Nations General Assembly, 2005). Como tal, o conceito de sustentabilidade passou a compreender a interdependência das três dimensões - económica, ambiental e social - de forma a enfatizar o equilíbrio que deve existir entre as variáveis de natureza económica e as preocupações ambientais e sociais na tomada de decisão (Diaz Gonçalves & Saporiti Machado, 2023; Purvis et al., 2019). Por outras palavras, o foco não deve estar apenas no desempenho económico, devendo considerar-se também a responsabilidade social e ambiental, ou seja, deve haver um equilíbrio entre os três pilares de forma que as decisões tomadas reduzam custos, mas também problemas sociais e, ainda, preservem o meio ambiente (Nogueira et al., 2025).

Deste modo, considerando a abordagem do tripé da sustentabilidade, podem existir impactos, positivos ou negativos, ao nível das três vertentes, ou seja, impactos de natureza ambiental, social e económica. O foco desta dissertação será referente aos impactos ambientais.

2.3. Principais alternativas de entrega e soluções logísticas sustentáveis

2.3.1. Veículos sustentáveis de entrega

Com a finalidade de melhorar o desempenho ambiental dos serviços de entregas de última milha, são utilizados nessa fase veículos mais sustentáveis, com zero emissões de gases, como é o caso dos veículos elétricos.

Relativamente aos impactos positivos dos veículos elétricos, além de não emitirem GEE, ao

contrário dos veículos a combustão interna, emitem menos ruído, o que contribui para uma melhoria ao nível da poluição sonora, e mostram-se como sendo uma opção mais ágil, apesar dessa agilidade estar diretamente ligada à sua capacidade e tamanho, sendo que quanto menores forem os veículos mais ágeis serão, já que conseguem circular em locais que outros veículos não conseguiriam (Van Duin et al., 2026).

Ainda assim, apesar dos possíveis benefícios que o uso deste tipo de veículos pode apresentar, é importante ter em atenção que, à semelhança de qualquer alternativa de entrega, estes também apresentam limitações, como, segundo Boysen et al. (2021) e Ehrler et al. (2021), a sua autonomia limitada, que resulta na necessidade de paragens para recarregar os veículos e, em relação ao investimento necessário para a sua aquisição, os elevados custos envolvidos, principalmente, quando comparado com o custo para adquirir veículos de combustão interna.

Como indicado em Van Duin et al. (2026), os veículos elétricos podem compreender automóveis, carrinhas e até camiões, mas também veículos de menor porte como triciclos e bicicletas. No entanto, as bicicletas, e a sua integração nos sistemas de entrega, tem vindo a ganhar destaque, quer elas sejam elétricas ou não.

Como já foi referido, a agilidade deste tipo de veículos está relacionada com a capacidade dos mesmos, pelo que as bicicletas sendo mais pequenas são usadas como uma opção para áreas mais densamente povoadas e zonas de acesso restrito (Anderluh et al., 2017; Caggiani et al., 2021). No entanto, de acordo com Anderluh et al. (2017), se por um lado a sua capacidade lhes confere mais agilidade, por outro transforma-se numa limitação, já que tendo pouca capacidade surge a necessidade de reabastecer a carga com frequência. Assim, devido à sua capacidade e velocidade limitadas, as bicicletas não são uma opção viável para realizar entregas em áreas maiores e mais distantes (Boysen et al., 2021; Malik et al., 2023; Vasiutina et al., 2021).

No entanto, ainda em relação aos ganhos associados ao uso de bicicletas nas entregas de *last-mile*, além de serem uma alternativa sustentável devido ao facto de não emitirem gases, como referem Malik et al. (2023) e Shafiee et al. (2026), o seu uso também contribui para melhores resultados económicos, traduzindo-se em menores custos totais (Caggiani et al., 2021).

Quanto aos desafios à sua implementação, além da sua capacidade limitada, que pode ser contornada conjugando o seu uso com *microhubs* para evitar deslocações a armazéns principais,

também em relação à mão-de-obra podem surgir limitações quando nos referimos a bicicletas que não são elétricas, já que o seu uso exige uma melhor condição física dos estafetas, o que condiciona, por exemplo a integração de recursos humanos com mais idade (Boysen et al., 2021).

Portanto, a utilização de veículos elétricos pode ser uma solução logística eficiente e sustentável que contribui para a melhoria das entregas de última milha.

2.3.2. Modelos colaborativos de entrega

Os modelos de entrega colaborativos têm-se manifestado como sendo soluções logísticas que contribuem para um transporte mais sustentável, económica e ambientalmente, contribuindo para níveis de congestionamento e de emissões mais reduzidos (Li et al., 2020). Como tal, têm surgido abordagens colaborativas em que se recorre à mobilização de terceiros para o desempenho de tarefas, em troca de uma compensação e, é nesse contexto que emerge o *crowdshipping*, que se trata-se de uma solução que conecta uma rede de indivíduos dispostos a colaborar no serviço de entregas, como forma de obterem um rendimento extra, com as empresas prestadoras desse serviço (Elsokkary et al., 2023; Sorooshian, 2026).

A utilização desta alternativa de entrega pode trazer diversos benefícios. Além de promover a colaboração social como refere Sorooshian (2026), visto que os estafetas são pessoas externas à empresa, oferece flexibilidade e quanto aos custos trata-se de uma opção menos dispendiosa para as empresas prestadoras de serviços logísticos, já que esta não tem que se preocupar com salários a longo prazo e, além disso, os estafetas utilizam os seus próprios veículos, pelo que a empresa também não tem gastos quanto a combustíveis (Boysen et al., 2021; De Bok et al., 2024). Do ponto de vista ambiental o *crowdshipping* pode, também, ser benéfico, dependendo do modo como os *crowdshippers* realizam a entrega das encomendas, ou seja, se as entregas forem realizadas a pé ou através de veículos verdes, e se não forem feitas viagens adicionais ou desvios, esta solução pode contribuir para a redução de externalidades negativas (Boysen et al., 2021; Pourrahmani & Jaller, 2021).

Ainda assim, esta alternativa enfrenta desafios, principalmente, no que respeita à confiança e fiabilidade do serviço, uma vez que os estafetas não são profissionais da empresa prestadora do serviço, pelo que, para evitar possíveis problemas relacionados a isso, devem implementar-se políticas de proteção para os remetentes e os destinatários, uma vez que os intermediários do serviço são

trabalhadores externos, e implementar-se medidas que protejam os estafetas de possíveis comportamentos dos restantes envolvidos (Pourrahmani & Jaller, 2021). Além disso, segundo o mesmo autor, é um fator crucial, também, a disponibilidade e número de indivíduos interessados em colaborar, sendo que uma outra barreira, segundo Van Duin et al. (2026) é a regulamentação que dificulta a adoção deste tipo de solução de entrega.

Ainda em relação a este tipo de solução, existem as entregas colaborativas, que consistem na partilha de recursos, como centros de consolidação, frotas de veículos, rotas e até clientes e dados, entre diferentes empresas prestadoras de serviços logísticos (De Souza et al., 2014; Muñoz-Villamizar et al., 2015). A logística colaborativa pode contribuir, portanto, para melhorar a eficácia e eficiência do processo de entregas e a sua sustentabilidade, uma vez que a sua adoção pode levar à redução de custos de transporte e de emissões de gases, em resultado da redução do número de veículos usados, sem, no entanto, comprometer o nível de serviço e, consequentemente, a satisfação do cliente (Muñoz-Villamizar et al., 2015). Além disso, existe um melhor aproveitamento dos recursos que são partilhados, promovendo maiores níveis de produtividade, eficiência e economias de escala para as entidades envolvidas (De Souza et al., 2014).

No entanto, esta solução apresenta, também, desafios principalmente a possibilidade de conflitos entre as empresas, decorrentes da partilha dos seus ativos, que pode resultar em disputas de propriedades e perda de controlo dos mesmos para as empresas com quem colaboram (Pingale et al., 2024). Como tal, uma forma de evitar tais conflitos é adotar a partilha de, apenas, ativos não estratégicos, em detrimento da partilha de infraestruturas, veículos e outros recursos, que pode comprometer a autonomia e interdependência das empresas entre si (Pingale et al., 2024).

Uma outra abordagem colaborativa é o transporte compartilhado de carga e passageiros, em que, por exemplo, um utilizador de *crowdshipping* leva consigo encomendas que, posteriormente, deixa num ponto de recolha, sendo que o transporte é realizado via transportes públicos, que não estão a utilizar toda a sua capacidade disponível (Boysen et al., 2021). Utilizar esta solução pode, portanto, contribuir para a sustentabilidade da última milha, já que em vez de se utilizar um outro meio de transporte, que poderia resultar em mais emissões de gases, é aproveitada a capacidade dos transportes públicos que não está a ser utilizada (Boysen et al., 2021; Machado et al., 2023). Assim, o aproveitamento das redes de transportes de passageiros para se realizar o transporte de mercadorias, pode ter potencial para reduzir os níveis de congestionamento e as emissões de gases, melhorando a eficiência das entregas, sem comprometer o transporte dos passageiros (Van Duin et al., 2026).

Em suma, o uso de estratégias colaborativas na última milha pode ser promissor para a sustentabilidade dessa fase das entregas, no entanto ainda apresenta desafios que podem limitar a sua adoção.

2.3.3. Centros de consolidação e *microhubs* urbanos

Os centros de consolidação e os *microhubs* são infraestruturas que têm a finalidade de consolidar carga até a mesma ser distribuída, por veículos mais sustentáveis, e estão localizadas em pontos estratégicos, com boa acessibilidade, contribuindo para otimizar as entregas de última milha, melhorando a eficiência das mesmas (Arrieta-Prieto et al., 2022; De Bok et al., 2024; De Souza et al., 2014).

Ainda que estas instalações contribuam para a sustentabilidade das entregas, uma vez que têm o potencial de reduzir os níveis de tráfego e de emissões de GEE, em relação ao investimento envolvem custos elevados, pelo que, normalmente, ou são necessários apoios governamentais ou as infraestruturas são utilizadas por várias empresas, no contexto da logística colaborativa, o que permite dividir os custos de investimento pelos vários participantes (Arrieta-Prieto et al., 2022; De Bok et al., 2024; De Souza et al., 2014).

Na prática, estas infraestruturas funcionam em conjunto com outras soluções, como com modelos colaborativos e veículos sustentáveis de entrega, ambas já mencionadas anteriormente (Boysen et al., 2021). Por exemplo, utilizar *microhubs* conjuntamente com *crowdshipping* pode ter um contributo positivo quanto a diferentes externalidades negativas (Shafiee et al., 2026). De acordo com De Bok et al. (2024), em relação à utilização dos centros de consolidação em conjunto com veículos, o sucesso dessa estratégia depende do tipo, da capacidade, da autonomia e de outras características dos veículos usados.

Além disso, geralmente, a ideia de *microhub* está associada a sistemas de entrega multinível, isto porque, por norma existe a sua integração, que pode ser vantajosa, com outros veículos, como camiões e bicicletas, em que os veículos de maior porte levam até ao *microhub* a carga e, de seguida, os pequenos veículos abastecem nesse mesmo local e entregam as encomendas aos clientes (Boysen et al., 2021; De Bok et al., 2024; Ehrler et al., 2021).

Por isso, apesar das diferentes soluções funcionarem isoladamente, a sua integração nos

sistemas de entrega, multinível ou não, pode contribuir para maximizar a sua eficiência.

2.3.4. Soluções *self-service*

Como as entregas ao domicílio, além de serem mais dispendiosas, muitas vezes falham, havendo a necessidade de várias tentativas de entrega, as soluções *self-service* têm ganho o seu espaço (Boysen et al., 2021). Assim, atualmente, alternativas como a utilização de pontos *click and collect* e de *lockers* são cada vez mais utilizadas como serviço de entrega de encomendas, sendo que, por isso, se verifica a crescente participação dos consumidores nos serviços de entrega (Jude et al., 2026).

Dessa forma, para evitar deslocações adicionais quer dos estafetas, quer dos clientes, devido a entregas falhadas, são introduzidos pontos de recolha com atendimento, ou não como é o caso dos cacifos, em estabelecimentos já existentes (Song et al., 2009). Segundo Campisi et al. (2025) e Song et al. (2009), esses estabelecimentos podem ser pequenas lojas e postos de correios ou de abastecimento, no caso de serem pontos com atendimento presencial e, no caso dos cacifos, além de poderem estar também nesses locais, muitas vezes também podem estar em grandes centros comerciais.

Neste caso, várias encomendas são deixadas no mesmo local, o que envolve menos custos de transporte para as empresas e menos emissões de GEE, já que os veículos se deslocam até um único ponto, sendo que, no entanto, os clientes devem ir levantar as suas encomendas a pé ou utilizando veículos verdes, para que o efeito não seja o oposto (Boysen et al., 2021; Campisi et al., 2025).

Com a implementação desses serviços de entrega *self-service*, também, problemas relacionados com entregas danificadas e devoluções são evitados, o que é positivo do ponto de vista da satisfação do cliente (Jude et al., 2026).

Em relação a aspetos a ter em conta, as empresas devem optar por reduzir as taxas associadas a portes de envio, para melhorar a atratividade deste tipo de modalidade, e devem escolher locais que sejam de fácil acesso, nomeadamente a pé (Boysen et al., 2021; Campisi et al., 2025). Também, em relação aos cacifos, a capacidade limitada deve ser um fator a considerar, pelo que o local onde os situar deve ser escolhido nesse sentido, uma vez que locais mais pequenos têm pouco espaço, e isso aliado à reduzida capacidade dos *lockers* pode resultar em menos clientes servidos (Boysen et al., 2021).

Por isso, ainda que dependa de determinados fatores, a implementação deste tipo de serviços

também pode contribuir para a sustentabilidade do *last-mile delivery*.

2.3.5. Tecnologias autónomas de entrega

De uma perspetiva já mais emergente, existem soluções de entregas que integram tecnologias autónomas, principalmente drones e robôs autónomos, que têm surgido em consequência dos maiores níveis de emissões de gases e de consumo energético (Garg et al., 2023).

Os drones, ou veículos aéreos não tripulados, destacam-se por oferecem vantagens como a não emissão de GEE, a capacidade de evitarem congestionamento e acidentes rodoviários e de realizarem entregas sem atrasos em zonas de difícil acesso (Boysen et al., 2021; Garg et al., 2023; Van Duin et al., 2026).

Para ditar o sucesso da implementação de drones nas entregas de última milha, há vários fatores críticos a ter em conta, como o tipo de drones utilizados e a sua capacidade, além do seu consumo energético e alcance (Garg et al., 2023). Quando usados para um menor número de entregas e para distâncias mais curtas, os drones podem contribuir para a descarbonização das entregas de última milha, no entanto, em contrapartida, para longas distâncias e várias entregas, alternativas de entrega convencionais, como camiões e outros veículos, podem ser opções mais amigas do ambiente (Garg et al., 2023).

Segundo Boysen et al. (2021), o uso de drones para a realização de entregas é limitado a uma única entrega de cada vez e com pouco peso, sendo que para satisfazer um grande número de clientes, é necessário uma frota maior de drones, que implica mais custos de investimento. A escassa regulamentação acerca do uso destas tecnologias, bem como a autonomia das mesmas, que depende de carregamentos ou trocas de bateria e questões associadas à aceitação das pessoas, são outras limitações relacionadas à integração de drones nas entregas de last-mile (Boysen et al., 2021). Além disso, de acordo com Eskandaripour e Boldsaikhan (2023), ainda que o uso destas tecnologias possa contribuir para a redução de GEE, a sua produção e o descarte das suas baterias podem ser prejudiciais para o ambiente, pelo que também esta questão pode ser vista como um entrave à sua utilização.

Quanto aos robôs autónomos, estes são pequenos veículos movidos a bateria utilizados para entregas em áreas restritas, sendo que o seu uso na última milha é promissor, no que respeita a entregas mais rápidas e flexíveis, com menos emissões e custos operacionais, podendo até ser integrados em

soluções colaborativas (De Bok et al., 2024; Lemardelé, Baldó, et al., 2023).

Apesar de serem uma solução promissora para curtas distâncias, também enfrentam desafios, especialmente relacionados com a sua reduzida velocidade. Além disso, como referem (Alverhed et al., 2024; Lemardelé, Baldó, et al., 2023; Van Duin et al., 2026), a aceitação da sociedade é outro aspeto a ter em conta, visto que por vezes o uso de robôs pode estar associado à redução de mão-de-obra e, à semelhança dos drones, também enfrentam lacunas em relação à regulamentação.

Como refere Garg et al. (2023), tanto drones como robôs podem ser utilizados em conjunto com outros veículos, mas, ainda assim, comparativamente ao uso de drones, a utilização de robôs autónomos, apesar de resultar em entregas mais lentas, permite a entrega de encomendas mais pesadas e, além disso, comparando com o uso de outros veículos, os robôs são uma opção mais segura, já que circulam por zonas pedonais (Boysen et al., 2021; Van Duin et al., 2026).

Tratando-se de alternativas ainda emergentes, existe ainda espaço para mais investigação acerca destas tecnologias, de forma a compreender melhor qual o seu potencial em relação à sustentabilidade da última milha.

2.4. Breve síntese da literatura

Ao longo deste capítulo, a revisão de literatura realizada permitiu enquadrar a problemática do *last-mile*, em particular da sustentabilidade das entregas. Foram explorados os principais conceitos relacionados com o tema e as principais estratégias e soluções de entrega identificadas na literatura, bem como os benefícios associados às mesmas e os desafios à sua implementação.

Esta revisão permite verificar que, ainda que cada alternativa de entrega apresente potencial para melhorar o desempenho ambiental das entregas de última milha, a redução das emissões de gases, e de outras externalidades negativas, depende não só da solução propriamente dita, mas do contexto urbano, e das características do mesmo, na qual essa é implementada.

Além disso, é importante referir que embora as soluções de última milha abordadas funcionem de forma isolada, não têm necessariamente de ser utilizadas dessa forma, sendo que muitas vezes são combinadas entre si com a finalidade de maximizar a sua eficiência.

3. Metodologia

O principal objetivo deste capítulo é explicitar a metodologia seguida nesta investigação, desde a pesquisa dos estudos, até à organização, síntese e análise dos mesmos.

De forma a sintetizar a informação existente na literatura acerca do tema em estudo, e para responder às questões de investigação definidas, esta dissertação foi conduzida através de uma revisão sistemática de literatura. Esta trata-se de um método utilizado para recolher, avaliar e sintetizar estudos relevantes sobre um tema, dando resposta a uma questão de investigação previamente definida e, portanto, fornecendo uma visão geral da literatura existente relacionada com esse tema (Moher et al., 2010; Pati & Lorusso, 2018; Williams et al., 2021). Além disso, de acordo com Williams et al. (2021), uma revisão sistemática é uma abordagem metodológica que permite, então, aprofundar os conhecimentos acerca de determinado assunto, assegurando os princípios de transparência.

Segundo G. Kim (2023), uma revisão sistemática deve seguir o seguinte procedimento metodológico: formular a questão de investigação; elaborar um protocolo de investigação; realizar uma pesquisa bibliográfica de todas as publicações científicas sobre o assunto em estudo, podendo incluir literatura cinzenta, a partir de termos de pesquisa e optando por bases de dados relevantes; proceder à seleção de publicações a incluir e a excluir, tendo por base os critérios definidos; avaliar o risco de ocorrerem erros sistemáticos; recolher dados para incluir na análise, podendo ser apresentados por meio de uma tabela de extração de dados; analisar os dados e apresentar os resultados obtidos; e, por fim, avaliar a qualidade dos resultados obtidos e estruturar conclusões.

Além disso, considerando que a declaração PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses*) tem como objetivo assegurar suporte metodológico e transparência na elaboração de revisões sistemáticas, foram seguidas as suas diretrizes na realização da revisão sistemática de literatura (Galvão et al., 2022; Moher et al., 2010).

3.1. Critérios de inclusão e exclusão

A fim de delimitar um conjunto de estudos relevantes, que fossem ao encontro das questões de investigação e dos objetivos estabelecidos, foram definidos os seguintes critérios de inclusão e de exclusão:

Critérios de inclusão:

- Fontes publicadas entre 2020 e 2025 (inclusive) – foram considerados apenas artigos nesta janela temporal, de forma que o foco sejam estudos mais recentes, que incluam o crescimento do *e-commerce* decorrente da pandemia COVID-19, que acentuou o *last-mile delivery*, levando à busca por novas alternativas;

- Publicações na língua inglesa – de forma a obter fontes com visibilidade global, consideraram-se apenas artigos em inglês, uma vez que a língua inglesa é a língua predominante no âmbito académico;

- Publicações pertencentes às áreas de conhecimento *Social Sciences*, *Business*, *Management*, *Accounting*, *Environmental Science*, *Energy* – foram analisados artigos de tais áreas, de forma a integrar as diferentes dimensões do tema;

- Artigos científicos de investigação, revistos por pares – de modo a garantir a qualidade, validade e rigor das fontes utilizadas, foram considerados apenas artigos revistos por pares;

- Artigos que tratam, explicitamente, a última milha, como objeto de estudo central;

- Artigos que apresentam alternativas de entrega sustentáveis e os seus respetivos impactos ambientais.

Estes dois últimos critérios foram considerados com a finalidade de garantir que as fontes consultadas e, posteriormente, selecionadas para analisar, não se desviassem do foco da dissertação.

Critérios de exclusão:

- Fontes publicadas em anos anteriores a 2020;

- Publicações em outras línguas, que não a inglesa;

- Publicações pertencentes a outras áreas (que não as referidas nos critérios de inclusão);

- Artigos científicos sem revisão por pares;

- Artigos que não tratam, explicitamente, a última milha, como objeto de estudo central;

- Artigos que não apresentam alternativas de entrega sustentáveis nem os seus respetivos impactos ambientais;

- Artigos que, ainda que verifiquem os critérios de inclusão anteriores, sejam maioritariamente técnicos e/ou conceptuais, bem como artigos que evidenciam o comportamento do cliente;

- Artigos de revisão (como revisões sistemáticas de literatura e *scoping reviews*, por exemplo).

3.2. Estratégia de pesquisa

Para a pesquisa de fontes de informação, foi utilizada a base de dados *ScienceDirect*, uma vez que a mesma tem um vasto leque de publicações científicas disponíveis, permitindo abranger diversas áreas de estudo, como os transportes, a logística e a sustentabilidade. Aliás, como os artigos disponibilizados são provenientes de fontes fidedignas e revistas de referência, conferem maior credibilidade e consistência à revisão sistemática de literatura.

Além disso, com a finalidade de dar resposta às questões de investigação definidas, é crucial fixar uma combinação de palavras-chave, que deve incluir termos relacionados com o objetivo do estudo, que neste caso passa por identificar as soluções propostas para tornar as entregas de última milha mais sustentáveis, bem como os principais impactos ambientais associados às mesmas. Desta forma, foi delimitada a seguinte combinação:

"last-mile delivery" AND ("environmental impact" OR "sustainability" OR "green logistics") AND ("solutions" OR "innovations")

É importante destacar que foram utilizados os operadores booleanos "AND" e "OR" para estruturar a chave de pesquisa, permitindo restringir a pesquisa, para garantir que todos os termos estejam incluídos nos resultados, e, simultaneamente, ampliar, com o uso de termos de pesquisa relacionados.

Da seguinte pesquisa, e já com a aplicação dos respetivos filtros, resultou um total de 309 artigos, sendo que a consulta na base de dados ocorreu a 24 de novembro de 2025.

Como forma de auxílio, foi utilizado o *software Zotero*, para organizar os artigos e gerar as devidas referências bibliográficas.

3.3. Síntese, análise e organização dos dados

De forma a sintetizar os dados obtidos e facilitar a sua análise, foi criada, num documento de Excel, uma tabela de extração de dados (Tabela 4, anexa no Apêndice A). Dessa forma, as informações mais relevantes constantes nos artigos analisados, foram organizadas nessa tabela, como o título, o ano de publicação do artigo e os seus autores. Além disso, encontram-se também enumerados outros dados como os principais objetivos de cada estudo, a estratégia de investigação utilizada, os impactos ambientais analisados, bem como as alternativas de entrega e a localização geográfica de cada estudo e, ainda, os valores quantificáveis obtidos em cada artigo.

Além disso, de forma a assegurar rigor e transparência, os artigos obtidos foram submetidos a uma avaliação metodológica, tendo sido aplicados, a cada artigo, um conjunto de critérios que compõem uma *checklist* (Tabela 5, anexa no Apêndice B). Portanto, para medir a qualidade metodológica dos estudos incluídos, foi elaborada essa *checklist* tendo por base os princípios das *guidelines* TRIPOD e STROBE e as boas práticas da ISPOR, que são ferramentas usadas com essa finalidade, especialmente na área da saúde. Assim, a partir dos tópicos desses instrumentos existentes, e tendo em conta que avaliar a qualidade dos artigos não se trata do foco deste trabalho, mas sim de um complemento, foi criada uma lista de critérios que, portanto, foi usada como uma ferramenta de análise crítica da qualidade dos estudos analisados na revisão sistemática.

Quanto à análise dos estudos obtidos, a mesma foi feita tendo por base uma abordagem dedutiva, em que, de acordo com Moraes (1999), devem ser estabelecidas categorias a priori. Assim, tendo por base a revisão de literatura, anteriormente realizada, foram definidas as categorias nas quais, posteriormente, se agruparam os artigos, sendo que após a leitura dos estudos foram feitos alguns ajustes às mesmas. Como tal, as categorias definidas foram: modelos colaborativos; micromobilidade elétrica; veículos elétricos e tecnologias de frota; sistemas de entrega multinível; soluções com tecnologias autónomas; e outras estratégias logísticas.

Finalmente, para uma melhor interpretação dos resultados, e tendo por base a estrutura CIMO, foi desenvolvida uma *framework* que assenta em quatro dimensões, sendo elas Estratégia (corresponde

à dimensão *Intervention* da CIMO), Contexto (corresponde à dimensão *Context* da CIMO), Impacto (corresponde à dimensão *Outcome* da CIMO) e Condições (corresponde à dimensão *Mechanism* da CIMO). A adoção desta *framework* permitiu relacionar cada solução logística com o seu contexto e com aquilo que resulta da sua aplicação e, ainda, com as causas que a podem condicionar. Além disso, contribuiu para uma interpretação dos resultados obtidos, possibilitando a comparação entre as diferentes soluções de última milha.

4. Resultados obtidos

Este capítulo tem como objetivo identificar quais as principais características de cada um dos estudos analisados, bem como sintetizar os principais resultados obtidos.

4.1. Seleção dos estudos e fluxograma PRISMA

Da pesquisa realizada, como mencionado no capítulo anterior, e já com a aplicação dos filtros, resultou um total de 309 artigos. Após uma triagem inicial, que consistiu na leitura dos títulos e dos resumos, esse número reduziu a 103 artigos. Seguida a leitura integral desses estudos, foram excluídos 70 artigos, uma vez que os mesmo não verificavam os critérios de inclusão ou apresentavam os critérios de exclusão não sendo, portanto, relevantes para o estudo em questão. Assim, no final foram selecionados 33 artigos.

Na figura 1 é apresentado o fluxograma PRISMA que ilustra o processo por detrás da seleção dos estudos a analisar, onde são indicados os motivos da exclusão dos artigos.

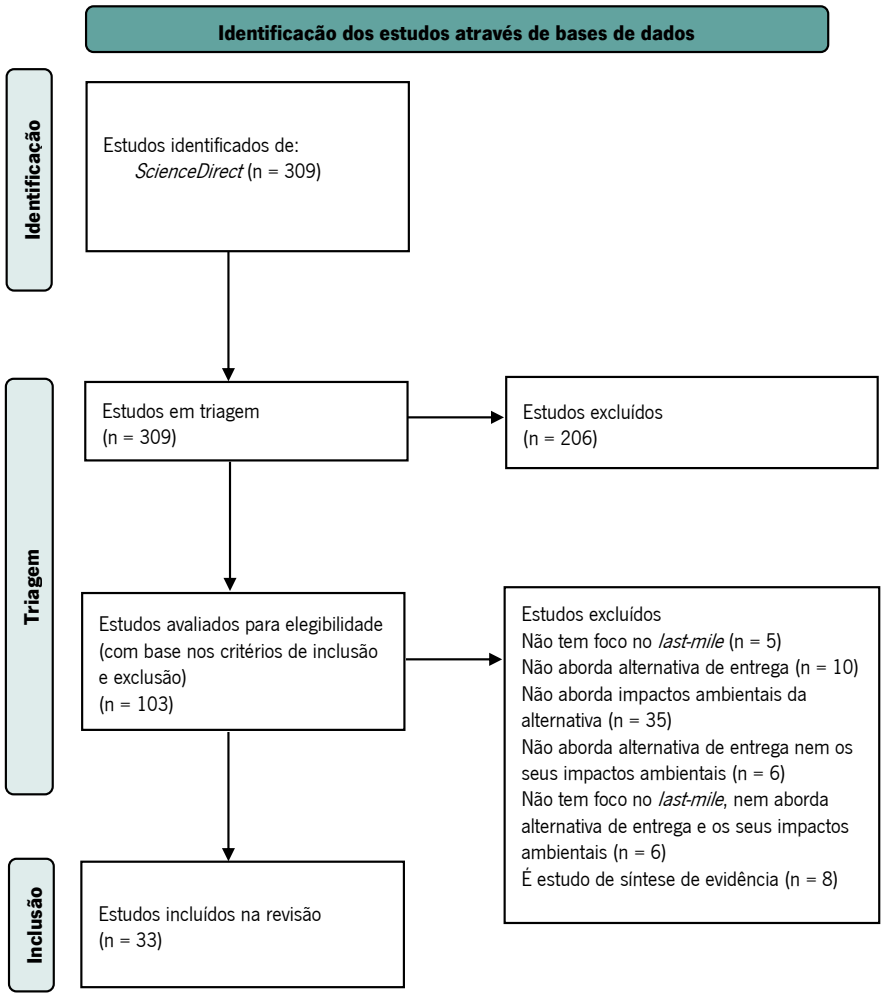


Figura 1 - Fluxograma PRISMA (Fonte: Adaptado de Page et al., 2021)

4.2. Caracterização dos estudos

Como se pode observar na Tabela 1, na qual estão agrupados, por temas, os estudos, dos 33 artigos analisados, 8 abordam modelos colaborativos, 6 micromobilidade elétrica, 6 outras estratégias logísticas, 5 sistemas de entrega multinível, 5 soluções com tecnologias e 3 veículos elétricos e tecnologias de frota.

Tabela 1 - Categorização dos artigos analisados

Título	Autores	Categoria
A disaggregate model of passenger-freight matching in crowdshipping services	Tapia et al. (2023)	Modelos colaborativos
A framework to organize public transport-based crowdshipping	M. Zhang e Cheah (2025)	
A simulative assessment of collaborative last mile delivery solutions	Buerklen et al. (2025)	
A sustainable crowd shipping model using public transport for low-carbon urban logistics	Naganawa et al. (2025)	
Collaborative distribution network design for sustainable parcel deliveries: A strategic modelling approach	Arevalo-Ascanio et al. (2025)	
Environmental and energy performance of integrated passenger–freight transport	Bruzzone et al. (2023)	
Feasibility of crowdshipping for outlier parcels in last-mile delivery	Cebeci et al. (2025)	
Investigating the use of microhubs and crowdshipping for last mile delivery	Ballare e Lin (2020)	
A large-scale analytical residential parcel delivery model evaluating greenhouse gas emissions, COVID-19 impact, and cargo bikes	Yang et al. (2024)	Micromobilidade elétrica
Characterization of urban distribution networks with light electric freight vehicles	Díaz-Ramírez et al. (2023)	
Evaluating Cargo Bike Delivery Applications in Urban Logistics: The Case of Zagreb	Ljubotina et al. (2025)	
Evaluation of cargo bike program for parcel deliveries in a medium-sized city	Galkin et al. (2025)	
Hydrogen cargo bikes as a data driven solution for last-mile decarbonization	Capkin (2025)	
Traffic impact on last mile parcel delivery with cargo bikes	Ritzer et al. (2023)	
Assessing the sustainability of last-mile distribution strategies to manage expedited shipping with dynamic and stochastic demand	Pahwa e Jaller (2025)	Outras estratégias logísticas
Environmental and operational impact of freight urban delivery: in store, home and locker	Jiménez et al. (2025)	
Hyperconnected urban fulfillment and delivery	N. Kim et al. (2021)	
Integrating first mile pickup and last-mile delivery on shared vehicle routes for efficient urban e commerce distribution	Bergmann et al. (2020)	
The environmental impact of fast delivery B2C e commerce in outbound logistics operations: A simulation approach	Pereira Marcilio Nogueira et al. (2022)	
The impact of optimal parcel locker locations on costs and the environment	Peppel e Spinler (2021)	
Autonomous Delivery Vehicles in Two-Echelon Routing for Sustainable Last Mile Logistics	Moradi et al. (2025)	Sistemas de entrega multinível
Life-cycle analysis of last-mile parcel delivery using autonomous delivery robots	Lemardelé, Pinheiro Melo, et al. (2023)	
Multi-objective optimization for two-echelon joint delivery location routing problem considering carbon emission under online shopping	Du et al. (2023)	
Multi-objective optimization of two-echelon delivery with autonomous delivery vehicles and electric two wheelers	Jin et al. (2025)	
Optimizing Two Echelon Logistics Network for Urban Logistics by LRP Heuristics with integrated Microscopic Transport Simulation	Deineko et al. (2025)	

Express shipments with autonomous robots and public transportation	Ermağan et al. (2024)	Soluções com tecnologias autónomas
Integration of UAVs with public transit for delivery: Quantifying system benefits and policy implications	Cui et al. (2024)	
Moving-micro hubs: Redefining last-mile logistics with autonomous hub vehicles (AHVs) and delivery robots (ADRs)	Montero-Vega e Estrada (2025)	
Towards a new last-mile delivery system: Cost and energy-optimized robot and van allocation	Klar et al. (2025)	
Urban case studies on optimized truck drone last-mile distribution	R. Zhang et al. (2025)	
Electric light commercial vehicles: Are they the sleeping giant of electromobility?	Tsakalidis et al. (2020)	Veículos elétricos e tecnologias de frota
Electrifying light commercial vehicles for last mile deliveries: Environmental and economic perspectives	Lal et al. (2023)	
Optimising vehicle and on-foot porter routing in urban logistics	Wehbi et al. (2022)	

Relativamente à abordagem de investigação, todos os artigos em análise seguem uma abordagem quantitativa. No entanto, conforme a Figura 2, diferem quanto ao tipo de estudo, sendo que alguns dos artigos compreendem mais que um. Dos 33 estudos analisados, a maioria utiliza modelação (29 artigos) e simulação (20 artigos) e, alguns, ainda apresentam uma validação por estudo de caso (20 artigos). Além disso, 16 usam otimização, 11 análise de cenários e, por fim, em apenas 3 é feita uma avaliação ambiental.

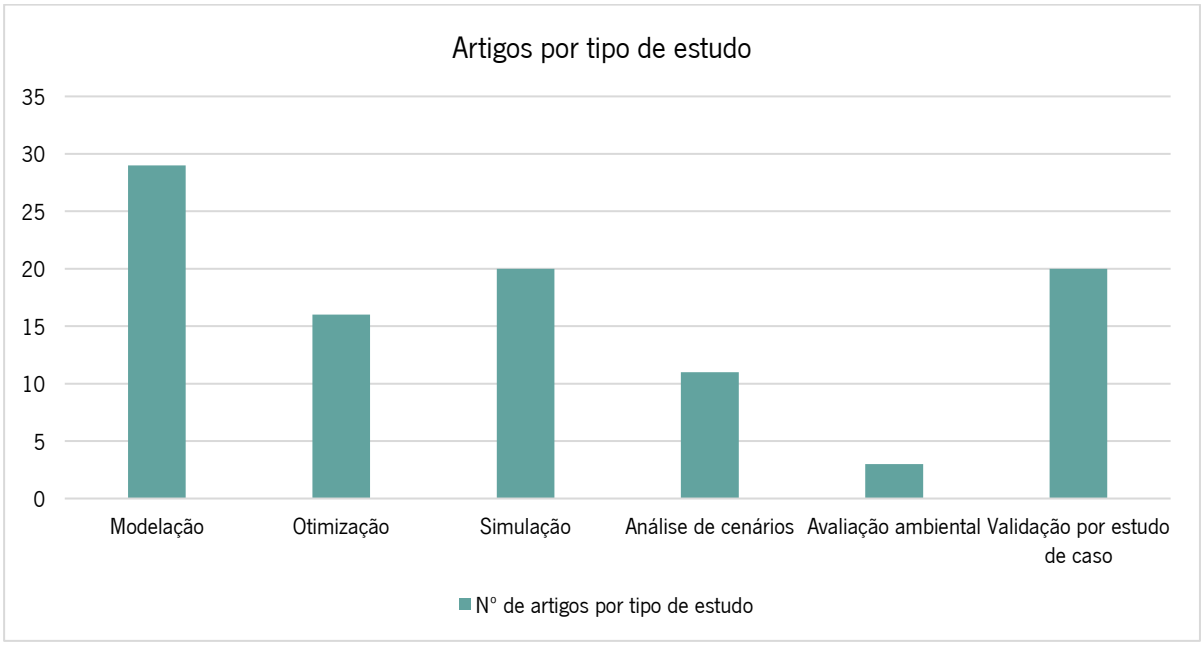


Figura 2 - Tipo de estudo dos artigos analisados

Quanto ao ano de publicação dos artigos analisados, a Figura 3 mostra que 2025 é o ano no qual foi publicado um maior número de estudos, havendo um aumento significativo de 13 artigos, comparando com 2024. Além disso, também, de 2022 para 2023 se verificou um acréscimo, ainda que

menor, de 5 artigos. Por outro lado, de 2020 para 2021 e de 2023 para 2024, pode observar-se uma redução de estudos publicados de 1 e 4 respetivamente, sendo que nos anos consecutivos de 2021 e 2022, foram publicados, em cada um desses anos, 2 dos artigos analisados.



Figura 3 - Ano de publicação dos artigos analisados

Em relação às fontes onde os estudos foram publicados, com base na Figura 4, observamos que a *Transportation Research Part D: Transport and Environment* foi a revista com um maior número de publicações, sendo que dos artigos analisados, 8 foram publicados na mesma. Destacam-se também as *Transportation Research Procedia* e a *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, com 6 e 5 estudos analisados, respetivamente. Quanto às restantes revistas, o número de estudos analisados publicados em cada uma delas varia entre 2 e 1.

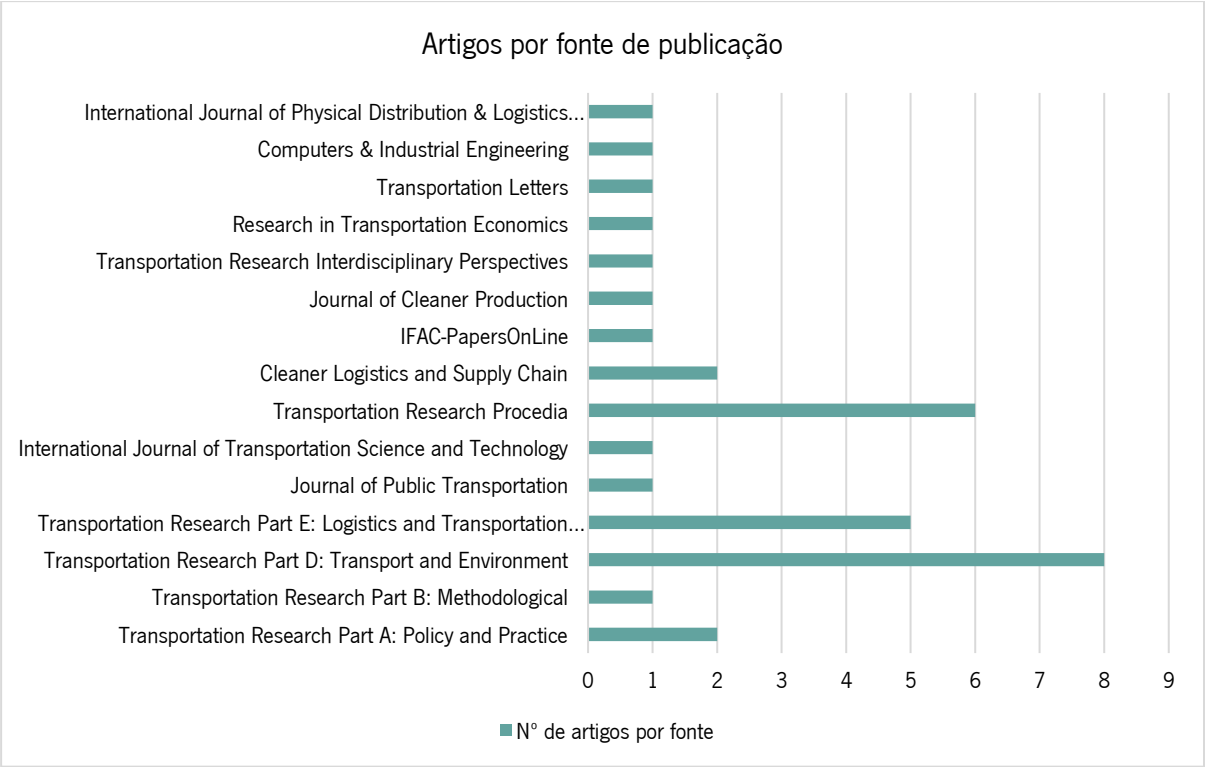


Figura 4 - Fonte de publicação dos artigos analisados

As Figuras 5 e 6 mostram a distribuição geográfica quanto aos continentes e os países de origem dos artigos analisados. É de notar que o mesmo artigo pode aparecer representado em mais do que um continente e país, uma vez que foram considerados o(s) país(es) de origem do(s) autor(es) de cada um dos artigos.

Como tal, na Figura 5 verifica-se que o continente com maior representatividade é a Europa com 55%, seguida da América com 24%, da Ásia com 17% e, por fim, da Oceânia com 4%. Pelo que, adicionalmente, verifica-se que nenhum dos estudos analisados tem origem em África.

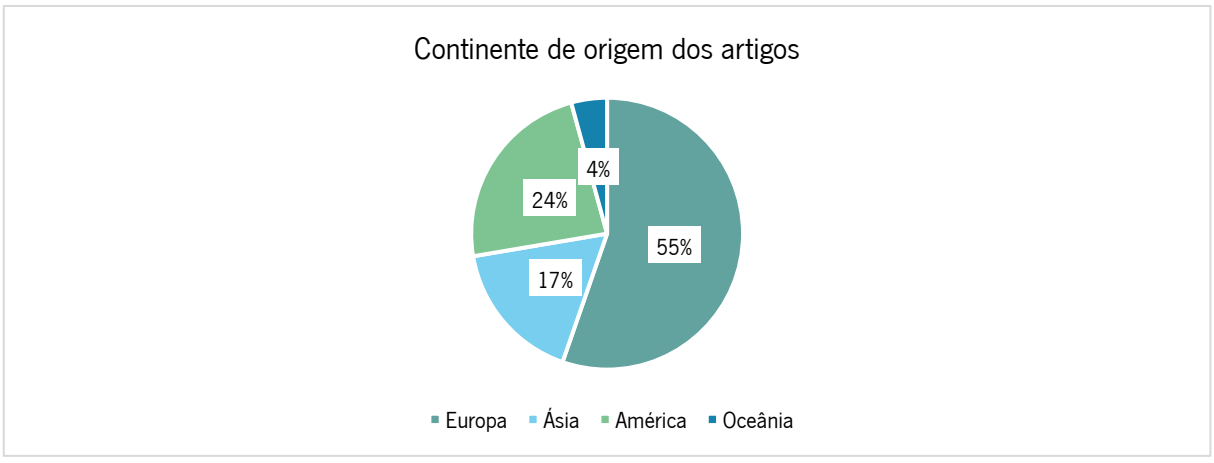


Figura 5 - Continente de origem dos artigos analisados

No que se refere aos países originários dos artigos, como podemos observar na Figura 6, destaca-se a Alemanha com 8 artigos de entre os que foram analisados e os EUA com 5. Além disso, Bélgica, China, Espanha e Itália contam com 3 artigos cada, seguindo-se Austrália, Brasil, Canadá, Países Baixos e Suécia com 2 artigos cada. Por fim, os restantes estudos analisados são originários de outros países, sendo que para cada um desses países foi publicado apenas 1 artigo. No total, são considerados 23 países.

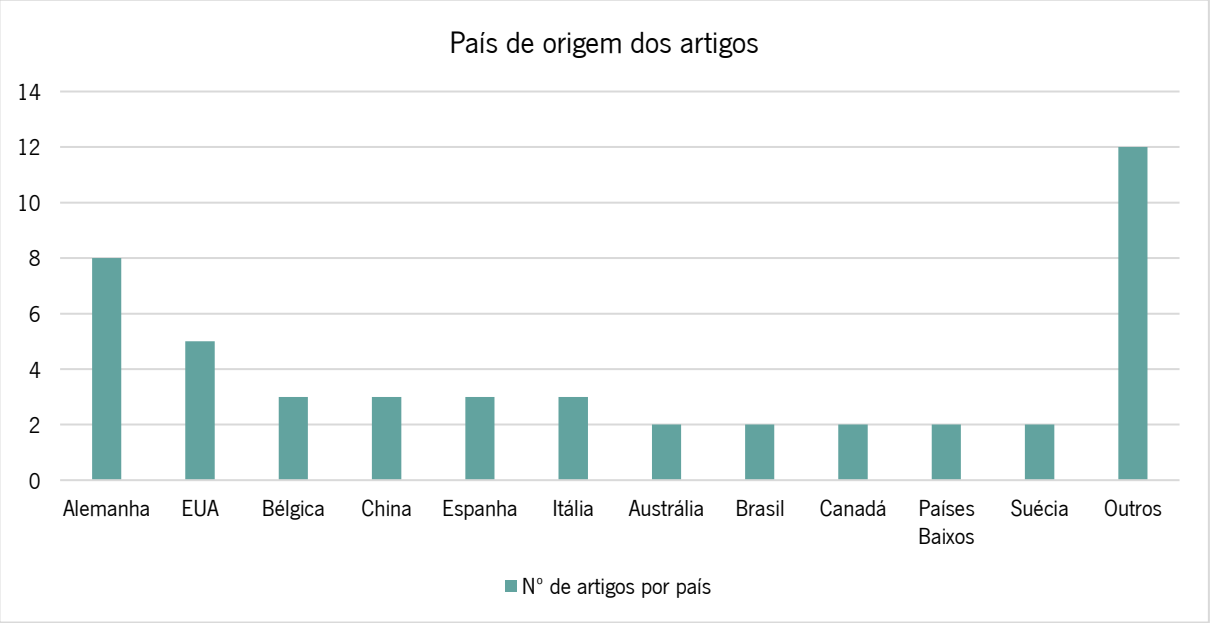


Figura 6 - País de origem dos artigos analisados

Ainda em relação ao contexto geográfico, mas desta vez relativamente às principais regiões estudadas nos artigos, podemos verificar pela Figura 7 que a Alemanha é o país que mais vezes é analisado nos 33 estudos considerados, aparecendo em 5 deles, seguida da China que aparece em 4, da Espanha e dos EUA que aparecem em 3 (cada um dos países) e, finalmente, dos Países Baixos que aparecem em 2 artigos. Podemos, também, observar que 6 dos artigos não se referem a nenhuma área geográfica em específico e que cerca de metade (14 artigos) se referem a outros países, ou seja, a países que, de entre os 33 artigos em análise, aparecem apenas num deles. Além disso, é de notar que o mesmo artigo pode analisar um país ou mais. No total foram estudados 17 países, sendo que um dos artigos apesar de considerar um país europeu não o identifica e um outro artigo refere-se a vários países europeus sem, também, identificar quais.

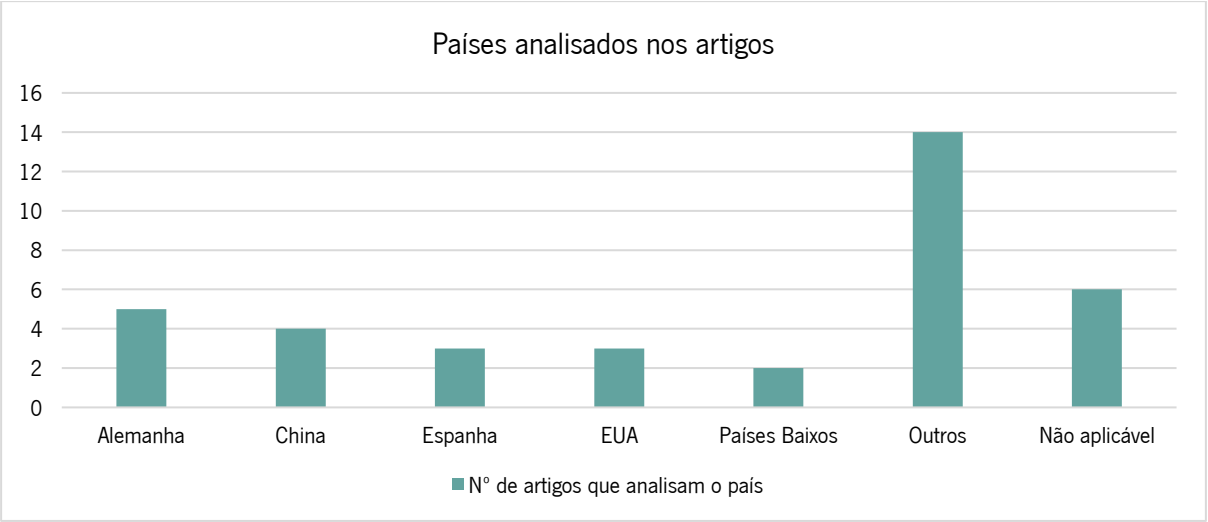


Figura 7 - Países estudados nos artigos analisados

Por fim, relativamente ao conteúdo dos estudos, diversos impactos ambientais (diretos e indiretos) são analisados nos mesmos. Como podemos observar na Figura 8, as emissões de GEE (como CO_2, C_4H, NO_x, N_2O, etc.) são o impacto que mais é abordado nos artigos, sendo que dos 33 artigos analisados, 27 tratam deste impacto, seguindo-se os quilómetros percorridos, que ainda que sejam um impacto ambiental indireto, são mencionados em 9 artigos. Também, o consumo energético e de combustível, o potencial de aquecimento global e o tráfego são analisados, ainda que em menor número. É de referir que no mesmo artigo podem ser analisados vários impactos e não apenas um, o que se reflete no gráfico da Figura 8.

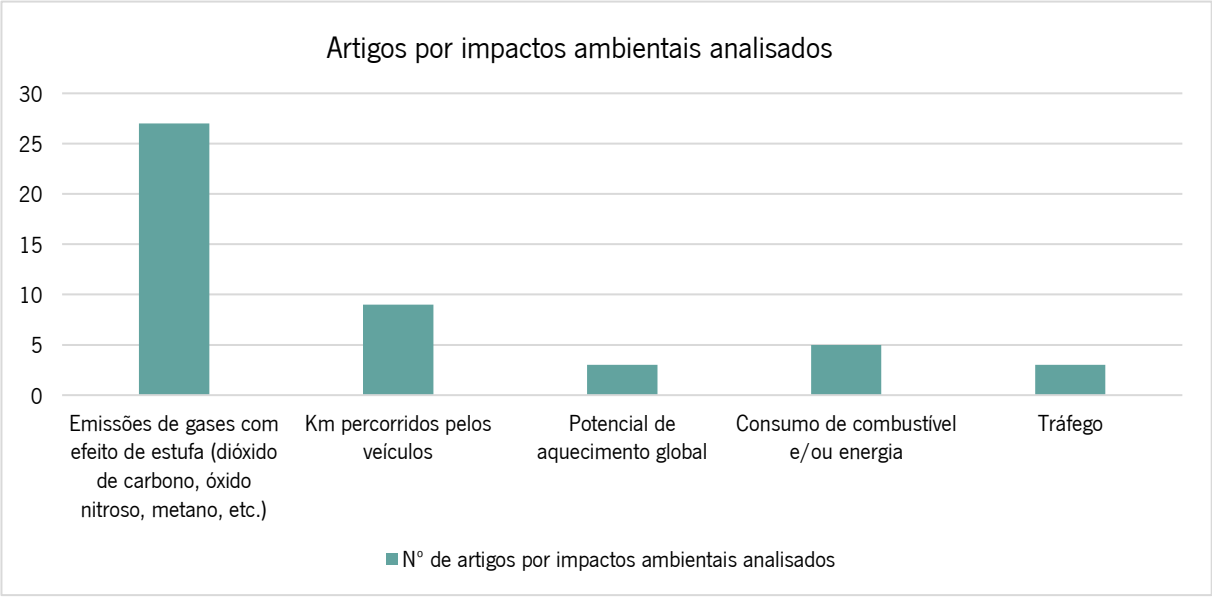


Figura 8 - Impactos ambientais estudados nos artigos analisados

4.3. Principais resultados dos estudos

4.3.1. Estudos que abordam modelos colaborativos

Quanto aos artigos analisados que consideram modelos colaborativos, Tapia et al. (2023) desenvolveram um modelo de simulação que concilia a procura e a oferta de serviços de *crowdshipping* e investigaram se o mesmo teria potencial como uma alternativa de entrega mais sustentável. Os resultados que os autores obtiveram sugerem que, apesar de parecer uma alternativa apelativa, o *crowdshipping* pode provocar um aumento tanto ao nível dos quilómetros percorridos, entre 14% e 30%, como das emissões, de até 16%.

Já M. Zhang e Cheah (2025) analisaram de que forma o *crowdshipping* com recurso a transportes públicos e a cacifos pode contribuir para uma maior eficiência e sustentabilidade do *last-mile delivery*. Através de análise de cenários, os autores defendem que esta solução logística pode ser benéfica para o ambiente, na medida em que, mesmo que apenas uma pequena percentagem das encomendas seja entregue via *crowdshipping*, se verificou uma redução significativa ao nível das emissões de gases e da quilometragem percorrida pelos veículos.

Buerklen et al. (2025) realizaram uma simulação de cenários com a finalidade de estudarem de que forma soluções colaborativas de logística de última milha podem contribuir ao nível da sustentabilidade e, com base nos resultados que obtiveram, defendem que a implementação de soluções dessa natureza contribui positivamente para reduzir as emissões de gases, sendo que as soluções investigadas integravam *microhubs* e estações de entregas com bicicletas de carga.

Por sua vez, Naganawa et al. (2025) desenvolveram um sistema de entregas colaborativo multimodal, que integra cacifos e transportes públicos com *crowdshipping* e analisaram o mesmo em relação ao seu possível contributo para uma melhoria ao nível dos impactos ambientais das entregas de última milha. No estudo foram simulados múltiplos cenários e os resultados indicaram que, principalmente, quando as encomendas são transportadas pelos passageiros de comboios ou automóveis, pode existir uma redução das emissões de CO_2 de cerca de 80%. No entanto, os autores concluíram que para todos os cenários simulados as emissões podem diminuir.

Arevalo-Ascanio et al. (2025) avaliaram uma estratégia de redes de distribuição colaborativas, com a integração de *hubs* partilhados em diferentes cenários, e concluíram que quanto maior for a quantidade de *hubs* partilhados melhores são os resultados em relação às emissões de CO_2.

Quanto a Bruzzone et al. (2023), estes autores realizaram uma investigação acerca de um sistema de transporte misto de carga e passageiros e do seu potencial desempenho do ponto de vista ambiental e, ainda, energético. Através de simulação e análise de cenários, verificou-se que o uso deste sistema de transporte misto pode reduzir significativamente tanto as emissões dos GEE como o consumo energético, até 60% e 63%, respetivamente, sendo que, no entanto, quanto aos quilómetros percorridos pelos veículos, o seu contributo é apenas ligeiro, não influenciando de forma significativa.

Em Cebeci et al. (2025) foi analisado o potencial do *crowdshipping* como solução logística de última milha e verificou-se que os benefícios do mesmo dependem de certos fatores como o tipo de transporte utilizado, as compensações oferecidas pela adoção desta solução e a densidade urbana. Como tal, concluiu-se que quando são utilizados automóveis as emissões de CO_2 aumentam e, em contraste, quando são usados transportes públicos e bicicletas estas diminuem. Além disso, relativamente às compensações os autores verificaram, ainda, que estas se encontram, também, diretamente relacionadas com as emissões, na medida em que quanto maior for a compensação oferecida, menores são as emissões.

Por fim, Ballare e Lin (2020), através da análise de diversos cenários, defendem que a integração de *microhubs* com *crowdshipping* pode constituir uma solução logística sustentável, uma vez que, segundo a investigação feita, além de uma redução ao nível dos custos, verificou-se, também, uma melhoria ao nível de outros indicadores, como uma redução de 50% ao nível da quilometragem percorrida pelos veículos e de cerca de 2/3 quanto ao consumo de combustível, em relação às entregas tradicionais. No entanto, os investigadores concluíram que, apesar de ser uma alternativa benéfica, o uso de *microhubs* e *crowdshipping* é mais acessível para redes de distribuição maiores, sendo uma solução cara quando estas têm uma menor dimensão.

4.3.2. Estudos que abordam micromobilidade elétrica

Em relação aos estudos que exploram alternativas logísticas de última milha que integram micromobilidade elétrica, em Yang et al. (2024) é proposto um modelo para prever tanto volumes de entregas, como distâncias percorridas e, ainda, analisar impactos sociais e ambientais relativamente às entregas de última milha. Desta investigação, os autores retiraram que usar bicicletas de carga elétricas pode reduzir a distância percorrida pelos veículos e, além disso, contribuir, também, para uma redução dos níveis de emissões de GEE.

Díaz-Ramírez et al. (2023) defendem que substituir uma frota tradicional de veículos movidos a combustíveis fósseis por veículos elétricos de baixas emissões, neste caso, bicicletas e triciclos elétricos, pode ser uma escolha acertada no que se refere a melhorar os impactos ambientais associados ao *last-mile delivery*, uma vez que se verificou uma redução de cerca de 95% das emissões. Neste estudo, os autores chegam a essa conclusão partindo da avaliação de ambas as opções (frota tradicional composta por camiões e motociclos e frota composta por bicicletas e triciclos elétricos), em particular, relativamente aos custos e às emissões de cada uma delas.

Ljubotina et al. (2025) investigaram o uso de bicicletas de carga num sistema de entregas, como alternativa sustentável para as operações de última milha, tendo comparado com um modelo de entregas convencional que integrava carrinhas. Em consequência do estudo feito, após a realização de simulações e do cálculo das emissões de CO_2, os autores defendem que a utilização de bicicletas de carga pode contribuir para uma redução de cerca de 40% dos níveis de emissão desse gás, uma vez que com o sistema de entregas convencional as emissões de CO_2 foram de 7,98kg e com aquele que considera o uso de bicicletas foram de 4,82kg. Portanto, os resultados do estudo reforçam que integrar bicicletas de carga nas entregas de última milha pode reduzir os impactos ambientais dessa etapa.

Galkin et al. (2025) avaliaram o uso de um serviço de distribuição composto por bicicletas de carga elétricas, da perspetiva económica e ambiental, e concluíram que, relativamente ao consumo de energia, a melhor opção mostrou-se ser as bicicletas de carga elétricas de 200 kg.

Quanto ao estudo de Capkin (2025), este analisou bicicletas de carga movidas a hidrogénio como alternativa a bicicletas de carga elétricas e carrinhas *vans* movidas a combustíveis fósseis, tendo comparado os três tipos de transporte. Ainda que ambos os tipos de bicicletas não emitam CO_2 e sejam uma alternativa favorável relativamente às carrinhas, os investigadores verificaram que apesar das bicicletas de carga elétricas serem, ainda, a melhor opção para distâncias curtas e áreas densamente povoadas, as bicicletas de hidrogénio são uma melhor alternativa para médias distâncias, uma vez que são mais autónomas e mais fáceis de abastecer, consumindo menos combustível.

Finalmente, Ritzer et al. (2023) concluíram que os níveis de intensidade do tráfego, na logística de última milha, estão diretamente relacionados com as emissões de CO_2, na medida em que quanto maior for essa intensidade, mais elevadas serão as emissões, sendo que, no entanto, a integração de bicicletas de carga nessa etapa contribui de forma benéfica para esse impacto ambiental.

4.3.3. Estudos que abordam veículos elétricos e tecnologias de frota

No que respeita aos artigos que analisam soluções de entrega com veículos elétricos e tecnologias de frota, Tsakalidis et al. (2020) realizaram uma avaliação económico-ambiental, com a finalidade de avaliar o uso de veículos comerciais elétricos e o seu potencial futuro nas entregas de última milha. Os autores concluíram que, com a utilização desses veículos, as emissões de CO_2 podem reduzir em 30%, as de NO_x em 5% e as de material particulado em 3% e, além disso, que a implementação de políticas de apoio ao uso deste tipo de veículos, pode contribuir para a integração dos mesmos nos sistemas de entrega.

Também Lal et al. (2023) realizaram uma avaliação económico-ambiental, de forma a avaliarem diversos tipos de veículos usados no *last-mile delivery* e os seus impactos. Os resultados mostraram que, comparando com veículos a combustão interna, os veículos elétricos a bateria têm à capacidade de reduzir as emissões de GEE em 55% e, ainda, de reduzir o potencial de aquecimento global, mostrando-se, portanto, benéficos do ponto de vista ambiental. Além disso, os investigadores avaliaram, também, veículos a hidrogénio e concluíram que, quando o hidrogénio é produzido com energias renováveis, estes têm um impacto ambiental negativo menor.

Já Wehbi et al. (2022) desenvolveram um novo modelo de entregas que integra carrinhas *vans* e carregadores a pé, para transporte da carga, e verificaram que, tanto em relação ao tempo de entrega, como no que respeita às emissões de CO_2, esta alternativa de entrega demonstrou potencial, ainda que o mesmo dependa de outros fatores, como a quantidade de clientes servidos pelo modelo.

4.3.4. Estudos que abordam sistemas de entrega multinível

Considerando os estudos onde são analisados sistemas de distribuição multinível, Moradi et al. (2025) avaliaram um sistema de entrega multinível, com dois níveis, com veículos elétricos e autónomos e, ainda, robôs na sua constituição. Os autores concluíram que quanto maior for a autonomia dos veículos, menores são as emissões de CO_2, o que contribui para tornar as atividades de última milha mais eficientes e sustentáveis.

Em Lemardelé, Pinheiro Melo, et al. (2023), os autores realizaram uma avaliação ambiental, com a finalidade de avaliar o desempenho ambiental de um sistema de entregas de dois níveis, com veículos pesados no primeiro nível e com robôs autónomos no segundo, e comparar com um sistema de entregas convencional, com veículos comerciais ligeiros. Do estudo realizado resultou que, quanto ao sistema que integra robôs, e em comparação com os veículos comerciais ligeiros, a fase de produção dos robôs se traduz num aumento do potencial de aquecimento global, sendo que, apesar disso, na fase de uso dos mesmos o consumo energético pode reduzir em mais de 25%.

Por sua vez, Du et al. (2023) recomendaram um modelo de distribuição conjunta, com o objetivo de promover a partilha de recursos de diferentes empresas e a colaboração entre as mesmas, sendo que esse modelo de entregas conjuntas é constituído por dois níveis e múltiplos depósitos. Os autores verificaram, com base nos resultados obtidos no estudo, que, de facto, as entregas conjuntas podem ter um contributo positivo para a sustentabilidade no *last-mile*, uma vez que as emissões de carbono podem reduzir cerca de 20,00 kg, em comparação às entregas independentes.

Em Jin et al. (2025) foi proposto, também, um modelo de entregas a dois níveis com veículos autónomos e veículos elétricos de duas rodas, sendo que os autores o analisaram do ponto de vista das emissões de GEE, sendo os resultados positivos, nesse sentido, já que se verificou uma redução de cerca de 30,62% comparando com um sistema de entregas convencional operado por triciclos.

Deineko et al. (2025), finalmente, analisam a otimização de redes logísticas de um sistema de distribuição de dois níveis baseado na utilização de *microhubs* e bicicletas de carga, tendo verificado que com a otimização o número de *microhubs* necessários reduziu em cerca de 33%, o que levou a um aumento de cerca de 3% tanto ao nível dos quilómetros percorridos pelos veículos como das emissões de CO_2.

4.3.5. Estudos que abordam soluções com tecnologias autónomas

Relativamente aos artigos nos quais são abordadas soluções de entrega que integram tecnologias autónomas, como drones e robôs, Ermağan et al. (2024) avaliaram um modelo de entregas que concilia o uso de transportes públicos, para transportar encomendas, com robôs autónomos, da perspetiva ambiental e económica, tendo concluído que esse novo modelo pode ter um contributivo

positivo ao nível das externalidades negativas, podendo reduzi-las em cerca de 80%, referindo-se essas externalidades, por exemplo, às emissões, ao tráfego e até mesmo ao ruído.

Em Cui et al. (2024) os investigadores, através do desenvolvimento de um novo modelo que integra drones com transportes públicos e de uma análise de cenários e posterior aplicação numa determinada área, defendem que essa integração, ainda que contribua para o aumento do tráfego, pode resultar numa redução ao nível das emissões de carbono de cerca de 811,40 toneladas por ano. Além disso, como esses resultados foram obtidos para a área em estudo, os autores defendem que os mesmos podem variar consoante o contexto urbano.

Montero-Vega e Estrada (2025) criaram e avaliaram um sistema de entregas a dois níveis, com veículos autónomos, com grande capacidade, que funcionam como *microhubs* móveis, e robôs autónomos que operam desde os *microhubs* até ao destino da encomenda. Dos resultados obtidos na investigação, os autores conseguiram verificar que o modelo desenvolvido pode ter a capacidade de contribuir para uma redução do potencial de aquecimento global.

Klar et al. (2025) avaliaram uma alternativa de entrega que combina carrinhas com robôs autónomos, quanto ao seu potencial do ponto de vista económico e ambiental e obtiveram resultados que comprovam que essa solução conjunta pode contribuir para reduzir o consumo de energia em 42%, sendo que esse impacto positivo pode depender da procura, da densidade de clientes por área, entre outros fatores.

R. Zhang et al. (2025) analisaram uma alternativa de entrega composta por um camião e tecnologias autónomas, tratando-se essas tecnologias, neste caso, de diversos drones, em cinco cidades distintas, comparando a mesma com a entrega tradicional rodoviária. Verificaram que a implementação dessa solução pode traduzir-se em diversos benefícios, podendo, principalmente, contribuir para reduções de cerca de 34% a 44% ao nível das emissões de CO_2.

4.3.6. Estudos que abordam outras estratégias logísticas

Quanto aos estudos que analisam outras alternativas e estratégias logísticas, Pahwa e Jaller (2025), com base no conceito de tripé da sustentabilidade, avaliaram diversas estratégias de distribuição e concluíram que, dependendo da estratégia utilizada, os resultados podem variar, sendo que, no entanto, aquela que mais se destacou positivamente foi a integração de camiões elétricos e carrinhas

elétricas, uma vez que as emissões de GEE nessa situação foram mínimas. Além dessa estratégia, os autores analisaram outras como a integração de veículos a gasóleo, de bicicletas de carga e de robôs e drones.

Por sua vez, também Jiménez et al. (2025) analisaram, no seu estudo, qual o desempenho ao nível da sustentabilidade de diferentes estratégias logísticas, tendo verificado, consoante os resultados que obtiveram na sua investigação, que a melhor alternativa, do ponto de vista ambiental, são as entregas em loja, uma vez que resultam em menos quilómetros percorridos pelos veículos de entregas e, consequentemente, em menores níveis de emissões de GEE. No entanto, ainda que as entregas de *e-commerce*, em casa ou em cacifos, não se tenham verificado como sendo a melhor opção, os autores defendem que, nesses casos, do ponto de vista ambiental, é mais sustentável que haja um centro de distribuição intermédio.

N. Kim et al. (2021) na sua investigação avaliaram o desempenho de um sistema hiperconectado de logística urbana aplicado ao *last-mile delivery* e concluíram que o uso desse sistema pode reduzir em cerca de 30% as emissões de GEE e de material particulado.

Quanto a Bergmann et al. (2020), estes analisaram uma outra estratégia logística, uma vez que estudaram a integração das operações de primeira e de última milha, quanto aos custos, aos níveis de tráfego e às emissões. Consoante o que foi obtido, concluiu-se que integrar as operações de ambas as fases da entrega pode levar a uma redução de até 16% dos impactos ao nível das externalidade negativas analisadas, ou seja, do tráfego e das emissões.

Em Pereira Marcilio Nogueira et al. (2022) foi avaliado de que forma diferentes níveis de flexibilidade de prazos e diferentes níveis de consolidação de encomendas podem influenciar, positiva ou negativamente, a sustentabilidade do serviço de entrega e das operações de *last-mile*. Deste estudo, concluiu-se que níveis de consolidação mais elevados, bem como tempos de entrega mais flexíveis, podem contribuir para uma diminuição da quilometragem percorrida e, consequentemente, do consumo de combustível e das emissões de GEE, uma vez que estes últimos se relacionam diretamente com os quilómetros percorridos pelos veículos. Como tal, decorrente dessas conclusões, os autores defendem, também, que entregas *express* têm um efeito negativo na quilometragem percorrida e, em consequência disso, nos restantes impactos ambientais.

Por fim, Peppel e Spinler (2021) criaram redes de cacifos fixos, com a finalidade de averiguarem o seu potencial de redução de custos de entrega e recolha e de emissões de CO_2 e verificaram que para

essas redes de cacifos terem um impacto positivo ao nível das emissões é essencial estarem localizadas em sítios ideais. Dessa forma, os investigadores defendem que se os cacifos estiverem localizados em áreas urbanas pode haver uma redução de até 2,5% ao nível das emissões, mas, por outro lado, se essa localização for em áreas com menor densidade populacional e mais afastadas as emissões podem sofrer um aumento de até 4,6%.

4.4. Síntese dos principais resultados dos estudos

Como se pode verificar, na Tabela 2, é apresentada uma breve síntese acerca dos principais resultados dos estudos analisados, quanto às soluções e estratégias mencionadas, os impactos ambientais analisados, a tendência dos resultados e, ainda, as principais observações.

Além disso, é de referir que, na Tabela 2, os resultados se encontram sintetizados consoante as categorias nas quais estão agrupados.

Tabela 2 - Síntese dos resultados dos estudos

Categoria	Estratégias	Estudos	Impactos ambientais analisados	Tendência dos resultados	Observações
Modelos colaborativos	*Crowdshipping* e transporte partilhado	Tapia et al. (2023); M. Zhang e Cheah (2025); Buerklen et al. (2025); Naganawa et al. (2025); Arevalo-Ascanio et al. (2025); Bruzzone et al. (2023); Cebeci et al. (2025); Ballare e Lin (2020)	Quilometragem percorrida pelos veículos; emissões de GEE; consumo de combustível	Mista	Resultados dependem dos meios de transporte utilizados
Micromobilidade elétrica	Bicicletas elétricas e a hidrogénio e triciclos elétricos	Yang et al. (2024); Díaz-Ramírez et al. (2023); Ljubotina et al. (2025); Galkin et al. (2025); Capkin (2025); Ritzer et al. (2023)	Quilometragem percorrida pelos veículos; emissões de GEE; consumo energético	Positiva	Resultados melhores em áreas urbanas mais densamente povoadas e menores distâncias
Veículos elétricos e tecnologias de frota	Veículos comerciais elétricos, veículos elétricos a bateria, veículos a hidrogénio e	Tsakalidis et al. (2020); Lal et al. (2023); Wehbi et al. (2022)	Emissões de GEE; GWP	Positiva	Resultados variam consoante as fontes de energia dos veículos e a existência de políticas de apoio

	carrinhas elétricas				
Sistemas de entrega multinível	Sistemas de 2 níveis com veículos elétricos, veículos e robôs autónomos e *microhubs*	Moradi et al. (2025); Lemardelé, Pinheiro Melo, et al. (2023); Du et al. (2023); Jin et al. (2025); Deineko et al. (2025)	Emissões de GEE; consumo energético; quilometragem percorrida pelos veículos	Geralmente positiva	Resultados dependem configuração da rede e dos veículos usados nos níveis
Tecnologias autónomas	Robôs autónomos e drones	Ermağan et al. (2024); Cui et al. (2024); Montero-Vega e Estrada (2025); Klar et al. (2025); R. Zhang et al. (2025)	Emissões de GEE; consumo energético; tráfego; GWP	Promissora (podendo variar)	Resultados dependem de fatores como o contexto urbano e as distâncias
Outras soluções logísticas	Cacifos, entregas em loja, integração das operações de primeira e de última milha, flexibilidade de prazos e consolidação	Pahwa e Jaller (2025); Jiménez et al. (2025); N. Kim et al. (2021); Bergmann et al. (2020); Pereira Marcilio Nogueira et al. (2022); Peppel e Spinler (2021)	Emissões de GEE; quilometragem percorrida pelos veículos; tráfego; consumo de combustível	Positiva (dependendo do contexto)	Resultados dependem de fatores como a localização das infraestruturas, as distâncias e os níveis de consolidação (consoante as diversas estratégias)

5. Discussão de Resultados

O principal objetivo deste capítulo é interpretar os resultados obtidos, bem como comparar os mesmos com a literatura existente e identificar e discutir possíveis limitações dos artigos analisados e da investigação feita e, ainda, linhas de investigação futura.

5.1. Interpretação dos resultados obtidos

Os resultados obtidos evidenciam que o desempenho ambiental das diversas soluções de entrega de última milha, bem como o contributo das mesmas para a sustentabilidade desta etapa da distribuição, varia consoante diversos fatores, como as características, condições e limitações associadas a cada uma das soluções e, também, o contexto no qual são implementadas.

Na categoria que agrupa os artigos que abordam modelos colaborativos, os autores desses estudos centram-se em avaliar o desempenho de estratégias colaborativas, partindo especialmente da análise de diversos cenários. O foco dos investigadores nesses estudos passa por comparar as diferentes situações, de forma a perceber os impactos ambientais que resultam da implementação de sistemas de entrega colaborativos, contrastando com os serviços de entrega convencionais.

Quanto aos artigos sobre micromobilidade elétrica, estes têm como foco averiguar, principalmente, o uso de bicicletas elétricas de carga, em complemento ou em substituição de outros veículos. Estes estudos permitem compreender de que forma as bicicletas elétricas podem contribuir para a sustentabilidade do processo de entrega de encomendas, destacando os impactos ambientais positivos resultantes da sua adoção em áreas urbanas.

Já nos estudos categorizados como sendo estudos acerca de veículos elétricos e tecnologias de frota, os investigadores focam-se em avaliar de que forma o uso de veículos mais sustentáveis nas entregas de *last-mile* impactam os níveis de emissões e, ainda, o potencial de aquecimento global.

Nos artigos que abordam sistemas de entrega multinível, são desenvolvidos e avaliados sistemas de entrega que integram mais que um modo de transporte, que são comparados a modelos de entrega convencionais, de forma a perceber quais os seus impactos.

Em relação aos estudos agrupados na categoria sobre soluções com tecnologias autónomas, os autores centram-se em avaliar a inclusão de tecnologias emergentes, como drones e robôs e veículos

autónomos, em sistemas de entregas, de forma a investigar de que forma essas tecnologias podem contribuir para a descarbonização do *last-mile*.

Finalmente, os artigos que se referem a outras soluções logísticas de última milha averiguam os possíveis benefícios e limitações de estratégias que não se enquadram diretamente em nenhuma das restantes categorias. São avaliadas estratégias relacionadas com níveis de consolidação e flexibilidade horária, entregas ao domicílio e entregas em cacifos e, até mesmo, integração de operações de primeira e última milha.

Com a finalidade de interpretar de forma mais detalhada e consistente os resultados obtidos, foi desenvolvida uma *framework*, com base na estrutura CIMO, como já foi referido anteriormente. Na Tabela 3, segue-se a mesma:

Tabela 3 - Síntese dos resultados segundo uma framework baseada na estrutura CIMO

Categoria	Estratégias	Contexto onde tem tendência a funcionar melhor	Impacto ambiental predominante	Condições críticas
Modelos colaborativos	*Crowdshipping* e transporte partilhado	Quando existe a integração de transportes públicos e não há desvios	Misto (Resultados mistos ao nível das emissões de GEE, da quilometragem percorrida e do consumo de combustível)	Modo de transporte; desvios, distâncias e número de viagens; compensação e disponibilidade de participantes; densidade urbana
Micromobilidade elétrica	Bicicletas elétricas e a hidrogénio e triciclos elétricos	Áreas urbanas densamente povoadas e curtas distâncias	Positivo (Redução das emissões de GEE, da quilometragem percorrida e do consumo energético)	Capacidade de carga (limitada); distâncias; densidade urbana
Veículos elétricos e tecnologias de frota	Veículos comerciais elétricos, veículos elétricos a bateria, veículos a hidrogénio e carrinhas elétricas	Quando existem políticas de apoio ao investimento	Positivo (Redução das emissões de GEE e do GWP)	Autonomia; fonte de energia; custo inicial de investimento e políticas de apoio
Sistemas de entrega multinível	Sistemas de 2 níveis com veículos elétricos, veículos e robôs autónomos e *microhubs*	Quando existe uma boa configuração da rede e uma boa coordenação entre os seus intervenientes	Geralmente positivo (Redução das emissões de GEE, da quilometragem percorrida e do consumo energético)	Localização dos *hubs* e configuração da rede; modo de transporte e integração
Tecnologias autónomas	Robôs autónomos e drones	Ambientes estruturados e de acesso restrito e curtas distâncias	Promissor (podendo variar)	Autonomia; regulamentação; aceitação; escala/dimensão do sistema de entregas;

			(Potencial de redução das emissões de GEE, do consumo energético, do GWP e do tráfego)	procura; densidade e contexto urbano
Outras soluções logísticas	Cacifos, entregas em loja, integração das operações de primeira e de última milha, flexibilidade de prazos e consolidação	Localização com boa acessibilidade e bom planeamento estratégico	Positivo (dependendo do contexto) (Redução das emissões de GEE, da quilometragem percorrida, do tráfego e do consumo energético, dependendo do contexto)	Flexibilidade temporal; nível de consolidação; modo de transporte; localização das infraestruturas; distâncias; densidade urbana

No que se refere às estratégias que envolvem modelos colaborativos, como o *crowdshipping* e a partilha de transporte e outros recursos, como *hubs*, entre prestadores de serviços de entregas, os resultados sugerem que, dependendo de certas condições, o impacto ambiental pode variar. O desempenho destas alternativas tende a ser mais favorável em contextos urbanos com mais fluxos de mobilidade, onde se aproveitam as viagens já existentes para se efetuarem as entregas e onde são integrados transportes públicos, como em Cebeci et al. (2025) e em Naganawa et al. (2025), podendo contribuir para a redução das emissões. Em contraste, quando ocorrem desvios adicionais e quando são utilizados de forma ineficiente automóveis particulares, a eficácia destas estratégias pode ser comprometida, havendo o potencial aumento da quilometragem percorrida e, consequentemente, dos gases emitidos, como se verifica no estudo de Tapia et al. (2023). Portanto, as condições em que os modelos colaborativos são implementados, como o modo de transporte utilizado, a disponibilidade de participantes, e a compensação que lhes é oferecida, e a densidade de mobilidade e fluxos, assumem um papel crucial na sua viabilidade.

A integração de soluções de micromobilidade elétrica, como bicicletas e triciclos elétricos, nas entregas de última milha é das alternativas mais consistentes, no que se refere ao seu potencial contributo para a descarbonização dessa etapa do transporte, especialmente quanto à redução de quilometragem percorrida pelos veículos e de emissões de GEE. A análise dos resultados sugere que estas soluções tendem a ser mais eficazes em contextos com maior densidade urbana e distâncias curtas e em áreas com restrições à circulação de veículos de grande porte. Além disso, a sua eficiência depende de outras condições como a substituição de outros veículos menos sustentáveis por estes, como nos estudos de Díaz-Ramírez et al. (2023) e de Galkin et al. (2025), e a necessidade de infraestruturas e ciclovias adequadas à sua circulação, como no estudo de Yang et al. (2024). No entanto, é essencial

considerar que o seu contributo para a sustentabilidade da última milha pode ser limitado, quando não se reúnem as condições necessárias para o seu potencial máximo. Pelo que, de forma a contornar essas limitações, particularmente em relação às distâncias e à sua capacidade limitada, e potenciar o seu desempenho ambiental, segundo Yang et al. (2024), a implementação de micromobilidade elétrica deve ser articulada com o uso de *microhubs* e outras infraestruturas.

Entre as soluções com um impacto positivo na sustentabilidade do *last-mile* podemos, ainda, destacar aquelas que são baseadas em veículos elétricos e tecnologias de frota, sendo que a sua adoção pode ter um contributo positivo tanto ao nível das emissões de GEE, como do potencial de aquecimento global. Ainda assim, apesar destas alternativas serem vistas como uma solução imediata para melhorar a sustentabilidade do processo de entregas, o benefício ambiental das mesmas está condicionado a certos fatores que podem ser determinantes, como a sua fonte de energia, já que, ainda que estes veículos não emitam gases quando circulam, é importante que a sua fonte de energia seja renovável, tal como sugere o estudo de Lal et al. (2023). Portanto, a partir dos resultados, torna-se evidente que a utilização de veículos elétricos atinge o seu potencial máximo quando estes estão integrados em contextos urbanos com operações logísticas bem estruturadas, onde as rotas são otimizadas e se tem em conta a capacidade, autonomia e fonte de energia dos veículos, e quando estes substituem, significativamente, as frotas de veículos convencionais. Além disso, apesar do potencial evidente da eletrificação das frotas, segundo o estudo de Tsakalidis et al. (2020), é importante a implementação de políticas de apoio ao investimento neste tipo de veículos.

Em relação aos sistemas de entrega multinível, em que se verifica a integração de diversos modos de transporte, os resultados indicam que, regra geral, o seu impacto é positivo, uma vez que contribui para a redução da quilometragem percorrida e, consequentemente, das emissões de gases. Estes sistemas de entregas tendem a ter um desempenho mais favorável em contextos urbanos com redes organizadas, com infraestruturas logísticas adequadas e com uma boa coordenação entre os intervenientes dos diferentes níveis. Ainda assim, a eficácia deste tipo de estratégia é sensível a certas condições como a localização dos *hubs*, que deve ser estratégica e ideal, para não comprometer o desempenho destes sistemas, e os modos de transportes utilizados e a sua devida integração, sendo que o estudo de Moradi et al. (2025) sugere que quanto maior for a autonomia dos transportes utilizados melhor o seu desempenho ambiental. Como tal, os benefícios esperados podem ser condicionados por limitações como a reduzida coordenação entre níveis e a localização inadequada dos *hubs*.

Quanto ao uso de tecnologias autónomas nas entregas de *last-mile*, os resultados apontam que, apesar deste enfrentar algumas barreiras, pode ser promissor para a sustentabilidade desta fase das entregas, sendo que o seu impacto ambiental depende do contexto no qual essas soluções são utilizadas. Como sugerem os resultados, o desempenho destas estratégias, que podem integrar drones e robôs autónomos, tende a ser mais favorável em cenários com entregas em distâncias mais curtas e zonas com restrições à circulação de veículos convencionais e em contextos mais controlados e organizados. Ainda assim, verifica-se que o desempenho destas tecnologias, no contexto das entregas, depende de determinadas condições como a procura e a dimensão do sistema de entregas, uma vez que se a procura for muito elevada, o sistema de entregas deve ser maior, e isso pode comprometer os benefícios destas soluções, como se verifica através dos resultados do estudo de Klar et al. (2025). Adicionalmente, questões relacionadas com a regulamentação, a aceitação e, também, a autonomia dos robôs e drones, podem condicionar os resultados destes sistemas de entrega.

Quanto a outras estratégias logísticas, que podem servir de complemento, como o uso de cacifos e pontos de recolha, as entregas em loja e estratégias que consideram diferentes níveis de consolidação, entre outras, os impactos ambientais por norma são positivos, mas podem variar consoante a estratégia que estiver em causa e o contexto no qual a mesma é implementada. Geralmente, essas estratégias tendem a ter um maior potencial quando existe uma boa acessibilidade e um bom planeamento estratégico, sendo que, ainda assim, esse potencial pode ser comprometido por outros fatores. A consolidação de carga e a flexibilidade temporal, bem como, segundo os estudos de Peppel e Spinler (2021) e de Pahwa e Jaller (2025), respetivamente, a localização estratégica das infraestruturas e o modo de transporte utilizado (quer para entrega, quer para recolha, como no caso dos cacifos e das entregas em loja), podem condicionar o desempenho das diversas soluções desta categoria. Além disso, a eficácia destas estratégias, principalmente daquelas que se referem à recolha de encomendas, está diretamente relacionada com a conveniência logística, uma vez que a localização das infraestruturas em locais próximos do cliente é uma condição crítica, já que caso contrário, muito provavelmente, a quilometragem percorrida aumentaria e, em consequência disso, as emissões de GEE também.

De forma a complementar a Tabela 3 foi, ainda, elaborado um diagrama de Sankey (Figura 9), que permite visualizar as relações entre as estratégias de distribuição e os contextos onde as mesmas são aplicadas e tendem a ter melhores resultados, bem como os seus impactos ambientais e as condições que podem influenciar a sua eficácia.

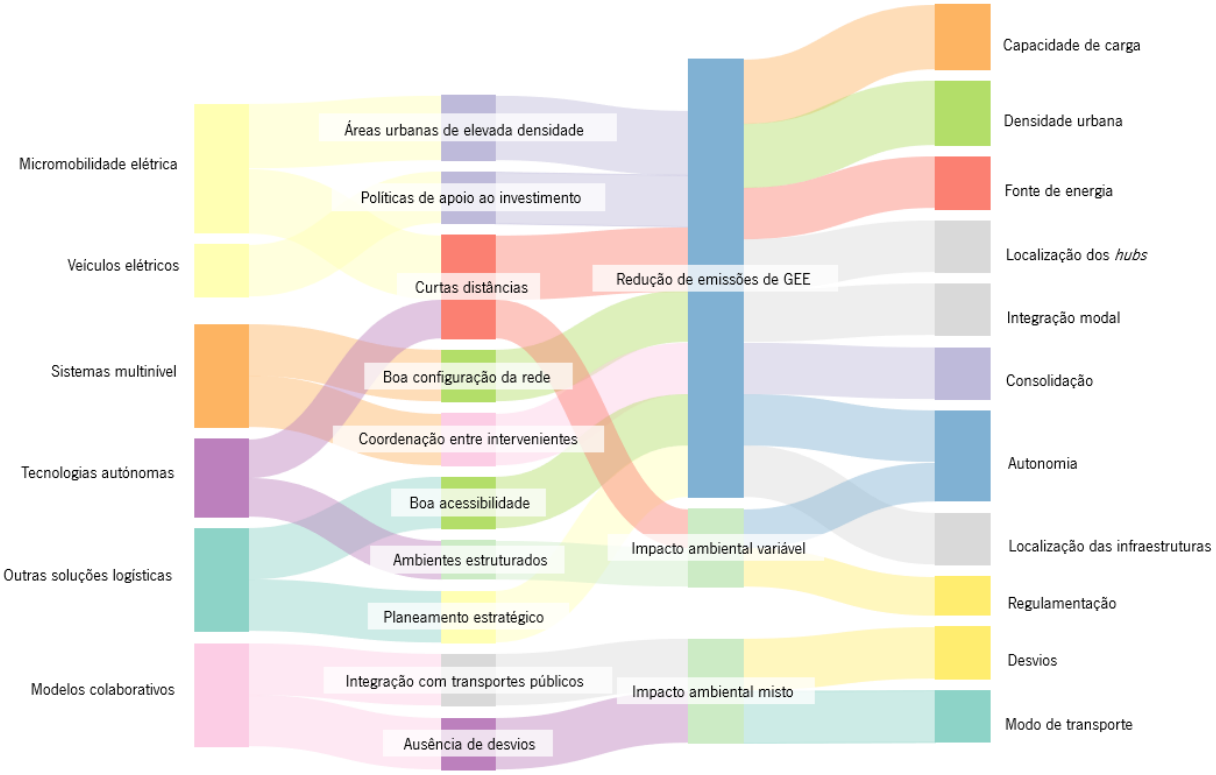


Figura 9 - Diagrama Sankey da framework baseada na estrutura CIMO

Em síntese, de forma transversal, verifica-se que, independentemente das soluções de entrega de *last-mile* em causa, o impacto ambiental de cada uma depende, fortemente, das condições nas quais a mesma é implementada. Como tal, é evidente que para cada contexto urbano, as alternativas de entrega adotadas devem ser adaptadas às características do mesmo, de forma a potenciar a sua eficiência e o seu desempenho ambiental. Além disso, a integração das diferentes estratégias pode, também, constituir uma forma de tornar o processo das entregas mais sustentável.

5.2. Comparação com a literatura existente

De modo geral, os resultados obtidos neste estudo estão em concordância com a literatura existente acerca do tema. Quanto às soluções colaborativas, à semelhança daquilo que os resultados sugerem, Boysen et al. (2021) e Pourrahmani e Jaller (2021) também acreditam que o modo de transporte utilizado para as entregas é decisivo quanto ao desempenho ambiental da solução, enquanto Elsokkary et al. (2023) e Sorooshian (2026) defendem que um fator crítico destas estratégias é a compensação oferecida aos *crowdshippers*.

Relativamente ao uso de bicicletas e triciclos elétricos, estes destacam-se como sendo as soluções mais eficazes para reduzir externalidades negativas em áreas mais densamente povoadas e para curtas distâncias, o que reforça as conclusões de Anderluh et al. (2017) e Caggiani et al. (2021), sendo que Boysen et al. (2021) acreditam que para potenciar o seu desempenho em distâncias mais longas devem ser utilizados conjuntamente com *microhubs*, o que também vai ao encontro dos resultados. No que respeita a outros veículos elétricos, em concordância com Ehrler et al. (2021), a autonomia e as fontes de energia são condições que podem influenciar o seu impacto ambiental.

Vários autores, como Boysen et al. (2021), De Bok et al. (2024) e Ehrler et al. (2021), nos seus estudos concluem que integrar diversos modos de transporte pode ser vantajoso, o que se relaciona com os resultados acerca dos sistemas de entrega multinível.

Em relação às soluções com tecnologias autónomas, estas são vistas como algo ainda emergente e que cujo desempenho pode depender de diversos fatores como a distância (Garg et al., 2023), a regulamentação e a aceitação da sociedade (Boysen et al., 2021), sendo que os resultados e a literatura também estão alinhados nesse sentido.

Como tal, de modo geral, os resultados estão alinhados com a literatura.

5.3. Limitações da evidência incluída

Embora a evidência incluída na revisão seja relevante e contribua para a compreensão do tema em estudo, esta não está isenta de limitações. Uma dessas limitações resulta da predominância de estudos baseados em simulação, que, muitas vezes, simplificam pressupostos, como falhas nas entregas, e dependem de cenários teóricos. Portanto, ainda que esses estudos sejam úteis, o facto de não considerarem condições reais, mas sim ideais, não traduz a verdadeira complexidade das entregas de última milha na realidade.

Outra limitação que se pode destacar deve-se ao facto dos estudos se focarem em determinadas cidades, cada uma com as suas próprias características, como a sua estrutura urbana, as infraestruturas existentes e a sua densidade populacional, por exemplo. Como tal, as conclusões retiradas dos estudos, por vezes, não podem ser generalizadas e os estudos não podem ser replicados, visto que a mesma solução pode ter uma eficácia diferente em diferentes contextos urbanos.

Finalmente, a evidência incluída considera horizontes temporais curtos, salientando análises de curto prazo. Dos estudos incluídos, grande parte, avaliam os impactos ambientais das alternativas e soluções de entrega, como os níveis de emissões de gases e de congestionamento, não considerando a evolução desses impactos ao longo do tempo. Dessa forma, a ausência de horizontes temporais maiores, constitui uma limitação, na medida em que não permite compreender a forma gradual como evoluem os diferentes impactos.

5.4. Limitações da revisão sistemática de literatura

Como qualquer investigação, esta revisão sistemática de literatura apresenta um conjunto de limitações. Primeiramente, pode ser destacado o facto de ter sido utilizada apenas uma base de dados para a pesquisa, sendo ela a *ScienceDirect*. Apesar da abrangência da base de dados utilizada, o seu uso exclusivo pode ter limitado o acesso a outras fontes de informação, possivelmente relevantes para o tema em análise, presentes noutras bases de dados.

Uma outra limitação da revisão é o horizonte temporal definido para a pesquisa, uma vez que foram apenas considerados artigos publicados de 2020 a 2025, tendo em conta o destaque que o assunto tem vindo a ganhar nos últimos anos, principalmente desde a pandemia do COVID-19. Por um

lado, esta delimitação contribuiu para garantir a atualidade dos estudos, no entanto, por outro lado, pode ter resultado na exclusão de estudos relevantes mais antigos, que poderiam servir de complemento, principalmente, relativamente a alternativas e soluções de entrega já mais exploradas.

Além disso foram apenas incluídos estudos primários, tendo sido excluídos estudos de síntese de evidência, como revisões sistemáticas de literatura, de forma a evitar duplicação de resultados. No entanto, ainda que se tenha evitado essa duplicação, a aplicação deste critério pode ter limitado a profundidade da análise. Adicionalmente, também não foram considerados estudos sem revisão por pares nem literatura cinzenta, pelo que relatórios de entidades, trabalhos académicos e estudos provenientes de outras fontes que, eventualmente, poderiam ser úteis, não foram incluídos, o que pode ter levado a uma representação enviesada da realidade.

Outra limitação relevante é o facto de se terem excluído artigos cujo foco central não era o *last-mile*, o que pode ter contribuído para deixar de fora estudos que, ainda que não tivessem esse foco, abordassem a sustentabilidade num contexto mais amplo da logística urbana.

Ainda acerca das limitações da revisão, a própria estratégia de pesquisa, particularmente a combinação de palavras-chave definida, pode ser considerada uma limitação, na medida em que, apesar do cuidado e rigor ao definir a mesma, podem ter sido deixados de fora artigos que utilizam terminologias diferentes daquelas que constituem a chave de pesquisa.

5.5. Implicações e direções futuras de investigação

A revisão sistemática de literatura realizada e os seus resultados evidenciam diversos contributos relevantes, quer para a implementação de práticas sustentáveis na logística de última milha, quer para o desenvolvimento e progresso da investigação na área. A evidência incluída no estudo e analisada demonstra a importância da integração de soluções amigas do ambiente nos sistemas de entrega, como veículos elétricos ou infraestruturas como *microhubs* e centros de consolidação, uma vez que estas têm um contributo positivo ao nível de impactos ambientais, como as emissões de GEE. No entanto, os resultados sugerem que as soluções devem ser adaptadas consoante o contexto urbano em causa, tendo em consideração certos fatores como a densidade populacional que variam de contexto para contexto.

Dessa forma, ao destacar o potencial das diferentes soluções logísticas quanto ao seu desempenho ambiental, este estudo pode contribuir para a promoção de soluções de distribuição de última milha mais sustentáveis, servindo de orientação e apoio na tomada de decisão de entidades públicas, como câmaras municipais, e operadores logísticos.

Do ponto de vista académico, este estudo apresenta determinadas limitações que sugerem novas direções para estudos futuros, limitações essas já mencionadas anteriormente. Portanto, tendo em conta essas limitações, estudos futuros não devem limitar a pesquisa a uma base de dados exclusiva e devem alargar o horizonte temporal da pesquisa e incluir diversos tipos de fontes, permitindo uma visão mais completa e uma análise mais abrangente acerca das diversas alternativas e os seus impactos ambientais.

Além disso, alinhado às limitações da evidência incluída, também já mencionadas, futuras investigações devem priorizar estudos longitudinais e baseados em dados reais, permitindo analisar a evolução dos impactos ao longo do tempo e validar empiricamente os resultados e, ainda, considerar diferentes tipologias de cidades, de forma a analisar a eficácia das alternativas em diferentes contextos urbanos.

Em suma, estas implicações e linhas de investigação futura reforçam a necessidade de aprofundar o conhecimento acerca da sustentabilidade ambiental do *last-mile* e o desenvolvimento de soluções de entrega verdes.

6. Conclusões

Com a finalidade de identificar quais as principais alternativas que podem tornar o *last-mile delivery* mais sustentável, referidas na literatura atualmente existente, bem como de compará-las entre si, esta dissertação foi desenvolvida tendo por base uma revisão sistemática de literatura. Como tal, verificou-se que os impactos ambientais e o desempenho de cada alternativa de entrega de última milha dependem diretamente do contexto urbano na qual é implementada e de certas condições, como a densidade urbana e a existência de infraestruturas adequadas. Adicionalmente, apesar do potencial de cada solução logística e das limitações que cada uma enfrenta, verificou-se que os resultados mais consistentes, quanto à minimização de externalidades negativas, como os níveis de emissões de GEE e o consumo energético, correspondem à integração de estratégias de micromobilidade elétrica.

Além disso, os resultados e as conclusões do estudo permitem responder às questões de investigação inicialmente definidas. Relativamente às principais alternativas de entrega analisadas na literatura, verificou-se que as que mais se destacam são as bicicletas de carga e outros veículos elétricos, os modelos de entrega colaborativos, os sistemas de entrega multinível e as soluções que integram o uso de tecnologias autónomas. Quanto aos impactos ambientais associados às soluções de *last-mile delivery*, e respondendo à segunda questão de investigação, são identificadas as emissões de GEE, o consumo energético e de combustível, o potencial de aquecimento global, a quilometragem percorrida pelos veículos e o nível de congestionamento e tráfego.

No entanto, apesar do estudo dar resposta às questões de investigação e objetivos definidos, este apresenta algumas limitações, podendo-se destacar a utilização exclusiva de uma única base de dados para a recolha dos artigos a analisar, que pode ter condicionado a seleção dos estudos para análise. Além disso, foi considerada uma janela temporal limitada que, ainda que tenha permitido obter apenas os estudos mais recentes, excluiu artigos anteriores que poderiam complementar os que foram incluídos.

Para concluir, é importante referir que, apesar do contributo que esta dissertação possa ter para um melhor entendimento do tema, é essencial aprofundar a investigação acerca deste assunto. Ora porque as tecnologias estão em constante evolução, o que se poderá traduzir, num futuro próximo, em novas alternativas para melhorar as entregas, ora porque as preocupações com questões ambientais também seguem uma tendência crescente, o que leva à urgência de se adaptarem as diversas práticas no contexto da logística urbana. Portanto, para investigações futuras seria crucial acompanhar essas

necessidades, apostando em mais estudos que testem, e comparem, as diversas alternativas em contextos reais e distintos, ou seja, com dados reais e em cidades e regiões de várias tipologias, de forma a melhorar as soluções já existentes e a desenvolver novas mais eficientes e sustentáveis.

Referências bibliográficas

Alhaddi, H. (2015). Triple Bottom Line and Sustainability: A Literature Review. *Business and Management Studies*, *1*. https://doi.org/10.11114/bms.v1i2.752

Alverhed, E., Hellgren, S., Isaksson, H., Olsson, L., Palmqvist, H., & Flodén, J. (2024). Autonomous last-mile delivery robots: A literature review. *European Transport Research Review*, *16*(1), 4. https://doi.org/10.1186/s12544-023-00629-7

Anderluh, A., Hemmelmayr, V. C., & Nolz, P. C. (2017). Synchronizing vans and cargo bikes in a city distribution network. *Central European Journal of Operations Research*, *25*(2), 345–376. https://doi.org/10.1007/s10100-016-0441-z

Arevalo-Ascanio, R., Meyer, A. D., Gevaers, R., Guisson, R., Verbelen, G., & Dewulf, W. (2025). Collaborative distribution network design for sustainable parcel deliveries: A strategic modelling approach. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *141*, 104667. https://doi.org/10.1016/j.trd.2025.104667

Arrieta-Prieto, M., Ismael, A., Rivera-Gonzalez, C., & Mitchell, J. E. (2022). Location of urban micro-consolidation centers to reduce the social cost of last-mile deliveries of cargo: A heuristic approach. *Networks*, *79*(3), 292–313. https://doi.org/10.1002/net.22076

Ballare, S., & Lin, J. (2020). Investigating the use of microhubs and crowdshipping for last mile delivery. *The 11th International Conference on City Logistics, Dubrovnik, Croatia, 12th - 14th June 2019*, *46*, 277–284. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.03.191

Bergmann, F. M., Wagner, S. M., & Winkenbach, M. (2020). Integrating first-mile pickup and last-mile delivery on shared vehicle routes for efficient urban e-commerce distribution. *Transportation Research Part B: Methodological*, *131*, 26–62. https://doi.org/10.1016/j.trb.2019.09.013

Bosona, T. (2020). Urban Freight Last Mile Logistics—Challenges and Opportunities to Improve Sustainability: A Literature Review. *Sustainability*, *12*(21), 8769. https://doi.org/10.3390/su12218769

Boysen, N., Fedtke, S., & Schwerdfeger, S. (2021). Last-mile delivery concepts: A survey from an operational research perspective. *OR Spectrum*, *43*(1), 1–58. https://doi.org/10.1007/s00291-020-00607-8

Bruzzone, F., Cavallaro, F., & Nocera, S. (2023). Environmental and energy performance of integrated passenger–freight transport. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, *22*, 100958. https://doi.org/10.1016/j.trip.2023.100958

Buerklen, A., Adeniran, I., & Kehrt, C. (2025). A simulative assessment of collaborative last mile delivery solutions. *World Conference on Transport Research - WCTR 2023 Montreal 17-21 July 2023*, *82*, 3925–3942. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2024.12.004

Caggiani, L., Colovic, A., Prencipe, L. P., & Ottomanelli, M. (2021). A green logistics solution for last-mile deliveries considering e-vans and e-cargo bikes. *23rd EURO Working Group on Transportation Meeting, EWGT 2020, 16-18 September 2020, Paphos, Cyprus*, *52*, 75–82. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.01.010

Campisi, T., Russo, A., Basbas, S., Bouhouras, E., & Tesoriere, G. (2025). Walkability and pick-up points in the Catania Metropolitan Area, Italy: Lessons learned. *Transportation Research Procedia*, *90*, 631–638. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2025.06.098

Capkin, S. O. K. (2025). Hydrogen cargo bikes as a data-driven solution for last-mile decarbonization. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *149*, 105046. https://doi.org/10.1016/j.trd.2025.105046

Cebeci, M. S., de Bok, M., Tapia, R., Nadi, A., & Tavasszy, L. (2025). Feasibility of crowdshipping for outlier parcels in last-mile delivery. *Research in Transportation Economics*, *112*, 101607. https://doi.org/10.1016/j.retrec.2025.101607

Crainic, T. G. (2008). City Logistics. Em *State-of-the-Art Decision-Making Tools in the Information-Intensive Age* (pp. 181–212). INFORMS. https://doi.org/10.1287/educ.1080.0047

Cruz, N. R. D., Barros, E. A. C., Lima, O. P. D., Maduro, M. R., Filho, W. L. C., & Diniz, P. C. (2024). Logística Urbana: Os Principais Desafios E Soluções Na Atualidade. *IOSR Journal of Business and Management*, *26*(11), 54–64. https://doi.org/10.9790/487X-2611015464

Cui, S., Yang, Y., Gao, K., Cui, H., & Najafi, A. (2024). Integration of UAVs with public transit for delivery: Quantifying system benefits and policy implications. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, *183*, 104048. https://doi.org/10.1016/j.tra.2024.104048

De Bok, M., Giasoumi, S., Tavasszy, L., Thoen, S., Nadi, A., & Streng, J. (2024). A simulation study of the impacts of micro-hub scenarios for city logistics in Rotterdam. *Research in Transportation Business & Management*, *56*, 101186. https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2024.101186

De Souza, R., Goh, M., Lau, H.-C., Ng, W.-S., & Tan, P.-S. (2014). Collaborative Urban Logistics – Synchronizing the Last Mile a Singapore Research Perspective. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, *125*, 422–431. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.01.1485

Deineko, E., Adeniran, I. O., Thaller, C., & Liedtke, G. (2025). Optimizing Two-Echelon Logistics Network for Urban Logistics by LRP Heuristics with integrated Microscopic Transport Simulation. *World Conference on Transport Research - WCTR 2023 Montreal 17-21 July 2023*, *82*, 2693–2707. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2024.12.213

Demir, E., Syntetos, A., & van Woensel, T. (2022). Last mile logistics: Research trends and needs. *IMA Journal of Management Mathematics*, *33*(4), 549–561. https://doi.org/10.1093/imaman/dpac006

Diaz Gonçalves, T., & Saporiti Machado, J. (2023). Origins of the Sustainability Concept and Its Application to the Construction Sector in the EU. *Sustainability*, *15*(18), 13775. https://doi.org/10.3390/su151813775

Díaz-Ramírez, J., Zazueta-Nassif, S., Galarza-Tamez, R., Prato-Sánchez, D., & Huertas, J. I. (2023). Characterization of urban distribution networks with light electric freight vehicles. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *119*, 103719. https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103719

Du, J., Wang, X., Wu, X., Zhou, F., & Zhou, L. (2023). Multi-objective optimization for two-echelon joint delivery location routing problem considering carbon emission under online shopping. *Transportation Letters*, *15*(8), 907–925. https://doi.org/10.1080/19427867.2022.2112857

Ehrler, V. C., Schöder, D., & Seidel, S. (2021). Challenges and perspectives for the use of electric vehicles for last mile logistics of grocery e-commerce – Findings from case studies in Germany. *E-groceries, digitalization and sustainability*, *87*, 100757. https://doi.org/10.1016/j.retrec.2019.100757

Elsokkary, N., Otrok, H., Singh, S., Mizouni, R., Barada, H., & Omar, M. (2023). Crowdsourced last mile delivery: Collaborative workforce assignment. *Internet of Things*, *22*, 100692. https://doi.org/10.1016/j.iot.2023.100692

Ermağan, U., Yıldız, B., & Salman, F. S. (2024). Express shipments with autonomous robots and public transportation. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *192*, 103782. https://doi.org/10.1016/j.tre.2024.103782

Eskandaripour, H., & Boldsaikhan, E. (2023). Last-Mile Drone Delivery: Past, Present, and Future. *Drones*, *7*(2), 77. https://doi.org/10.3390/drones7020077

Galkin, A., Švadlenka, L., Vrba, R., & Oliveira, L. K. de. (2025). Evaluation of cargo bike program for parcel deliveries in a medium-sized city. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *140*, 104609. https://doi.org/10.1016/j.trd.2025.104609

Galvão, T. F., Tiguman, G. M. B., & Sarkis-Onofre, R. (2022). A declaração PRISMA 2020 em português: Recomendações atualizadas para o relato de revisões sistemáticas. *Epidemiologia e Serviços de Saúde*, *31*, e2022364. https://doi.org/10.1590/SS2237-9622202200011

Garg, V., Niranjan, S., Prybutok, V., Pohlen, T., & Gligor, D. (2023). Drones in last-mile delivery: A systematic review on Efficiency, Accessibility, and Sustainability. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *123*, 103831. https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103831

Jiménez, P., Garrido, L., Gomez, J., & Vassallo, J. M. (2025). Environmental and operational impact of freight urban delivery: In-store, home and locker. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *149*, 105026. https://doi.org/10.1016/j.trd.2025.105026

Jin, Z., Lu, M., Li, X., Zhang, S., & Hsu, S.-C. (2025). Multi-objective optimization of two-echelon delivery with autonomous delivery vehicles and electric two-wheelers. *Computers & Industrial Engineering*, *203*, 110999. https://doi.org/10.1016/j.cie.2025.110999

Jude, G., Fahimnia, B., & Beck, M. J. (2026). Consumer motivation to collaborate in last mile logistics. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *206*, 104447. https://doi.org/10.1016/j.tre.2025.104447

Kahalimoghadam, M., Thompson, R. G., & Rajabifard, A. (2024). Assessing unsustainable trends in city logistics. *City Logistics 2023*, *79*, 401–408. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2024.03.053

Kim, G. (2023). How to perform and write a systematic review and meta-analysis. *Child Health Nursing Research*, *29*(3), 161–165. https://doi.org/10.4094/chnr.2023.29.3.161

Kim, N., Montreuil, B., Klibi, W., & Kholgade, N. (2021). Hyperconnected urban fulfillment and delivery. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *145*, 102104. https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.102104

Klar, R., Arvidsson, N., & Rudmark, D. (2025). Towards a new last-mile delivery system: Cost and energy-optimized robot and van allocation. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *204*, 104392. https://doi.org/10.1016/j.tre.2025.104392

Lal, A., Renaldy, T., Breuning, L., Hamacher, T., & You, F. (2023). Electrifying light commercial vehicles for last-mile deliveries: Environmental and economic perspectives. *Journal of Cleaner Production*, *416*, 137933. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137933

Lemardelé, C., Baldó, A., Aniculaesei, A., Rausch, A., Conill, M., Everding, L., Vietor, T., Hegerhorst, T., Henze, R., Mátyus, L., Pagès, L., Rocag, V., Sanfeliu, A., Santamaria-Navarro, A., & Tóháti, I. (2023). The LogiSmile Project—Piloting Autonomous Vehicles for Last-Mile Logistics in European cities. *Transportation Research Procedia*, *71*, 180–187. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.073

Lemardelé, C., Pinheiro Melo, S., Cerdas, F., Herrmann, C., & Estrada, M. (2023). Life-cycle analysis of last-mile parcel delivery using autonomous delivery robots. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *121*, 103842. https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103842

Li, F., Guo, X., Zhou, L., Wu, J., & Li, T. (2020). A capacity matching model in a collaborative urban public transport system: Integrating passenger and freight transportation. *International Journal of Production Research*, 6303–6328. https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1991021

Ljubotina, L., Ševrović, M., Pirdavani, A., & Jovanović, B. (2025). Evaluating Cargo Bike Delivery Applications in Urban Logistics: The Case of Zagreb. *TRPRO_TRANSCODE 2025*, *91*, 235–242. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2025.10.031

Machado, B., Pimentel, C., & De Sousa, A. (2023). Urban logistics transportation system combining passenger and freight flows: A heuristic approach. *Transportation Research Procedia*, *72*, 4476–4483. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.296

Malik, F. A., Egan, R., Dowling, C. M., & Caulfield, B. (2023). Factors influencing e-cargo bike mode choice for small businesses. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *178*, 113253.

https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113253

Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., & Altman, D. G. (2010). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement. *International Journal of Surgery*, *8*(5), 336–341. https://doi.org/10.1016/j.ijsu.2010.02.007

Montero-Vega, M., & Estrada, M. (2025). Moving-micro hubs: Redefining last-mile logistics with autonomous hub vehicles (AHVs) and delivery robots (ADRs). *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *203*, 104229. https://doi.org/10.1016/j.tre.2025.104229

Moradi, N., Kayvanfar, V., & Baldacci, R. (2025). Autonomous Delivery Vehicles in Two-Echelon Routing for Sustainable Last-Mile Logistics. *11th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control MIM 2025*, *59*(10), 2598–2603. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2025.09.437

Moraes, R. (1999). Análise de conteúdo. *Revista Educação*, *22*(37), 7–32.

Muñoz-Villamizar, A., Montoya-Torres, J. R., & Vega-Mejía, C. A. (2015). Non-Collaborative versus Collaborative Last-Mile Delivery in Urban Systems with Stochastic Demands. *Procedia CIRP*, *30*, 263–268. https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.147

Naganawa, H., Hirata, E., & Thompson, R. G. (2025). A sustainable crowd shipping model using public transport for low-carbon urban logistics. *Cleaner Logistics and Supply Chain*, *17*, 100276. https://doi.org/10.1016/j.clscn.2025.100276

Nogueira, G. P. M., Silva, S. V., Hasenclever, L., & de Assis Rangel, J. J. (2025). Sustainability in B2C e-commerce: A literature review and future research opportunities in last-mile deliveries. *Environment, Development and Sustainability*, *27*(6), 12415–12436. https://doi.org/10.1007/s10668-024-04471-2

Olsson, J., Hellström, D., & Pålsson, H. (2019). Framework of Last Mile Logistics Research: A Systematic Review of the Literature. *Sustainability*, *11*(24), 7131. https://doi.org/10.3390/su11247131

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, n71. https://doi.org/10.1136/bmj.n71

Pahwa, A., & Jaller, M. (2025). Assessing the sustainability of last-mile distribution strategies to manage

expedited shipping with dynamic and stochastic demand. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *201*, 104273. https://doi.org/10.1016/j.tre.2025.104273

Pati, D., & Lorusso, L. N. (2018). *How to Write a Systematic Review of the Literature—Debajyoti Pati, Lesa N. Lorusso*. https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1937586717747384

Peppel, M., & Spinler, S. (2021). The impact of optimal parcel locker locations on costs and the environment. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, *52*(4), 324–350. https://doi.org/10.1108/IJPDLM-07-2021-0287

Pereira Marcilio Nogueira, G., José de Assis Rangel, J., Rossi Croce, P., & Almeida Peixoto, T. (2022). The environmental impact of fast delivery B2C e-commerce in outbound logistics operations: A simulation approach. *Cleaner Logistics and Supply Chain*, *5*, 100070. https://doi.org/10.1016/j.clscn.2022.100070

Pingale, S., Kaur, A., & Agarwal, R. (2024). Collaborative last mile delivery: A two-echelon vehicle routing model with collaboration points. *Expert Systems with Applications*, *252*, 124164. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.124164

Pourmohammadreza, N., Jokar, M. R. A., & Van Woensel, T. (2025). Last-mile logistics with alternative delivery locations: A systematic literature review. *Results in Engineering*, *25*, 104085. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104085

Pourrahmani, E., & Jaller, M. (2021). Crowdshipping in last mile deliveries: Operational challenges and research opportunities. *Socio-Economic Planning Sciences*, *78*, 101063. https://doi.org/10.1016/j.seps.2021.101063

Purvis, B., Mao, Y., & Robinson, D. (2019). Three pillars of sustainability: In search of conceptual origins. *Sustainability Science*, *14*(3), 681–695. https://doi.org/10.1007/s11625-018-0627-5

Ritzer, P., Geischberger, J., Adeniran, I. O., & Thaller, C. (2023). Traffic impact on last mile parcel delivery with cargo bikes. *TRA Lisbon 2022 Conference Proceedings Transport Research Arena (TRA Lisbon 2022),14th-17th November 2022, Lisboa, Portugal*, *72*, 3656–3663. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.555

Sangkhiew, N., & Pornsing, C. (2018). *Last mile delivery: Modes, efficiencies, sustainability, and trends*.

Schöder, D., Ding, F., & Campos, J. K. (2016). The Impact of E-Commerce Development on Urban Logistics Sustainability. *Open Journal of Social Sciences*, *04*(03), 1–6. https://doi.org/10.4236/jss.2016.43001

Shafiee, A., Rastegar Moghaddam, H., Ballare, S., & Lin, J. (2026). An alternative last-mile delivery system: Leveraging microhubs and crowdshipping. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *154*, 105239. https://doi.org/10.1016/j.trd.2026.105239

Shuaibu, A. S., Mahmoud, A. S., & Sheltami, T. R. (2025). A Review of Last-Mile Delivery Optimization: Strategies, Technologies, Drone Integration, and Future Trends. *Drones*, *9*(3), 158. https://doi.org/10.3390/drones9030158

Silva, V., Amaral, A., & Fontes, T. (2023). Sustainable Urban Last-Mile Logistics: A Systematic Literature Review. *Sustainability*, *15*(3), 2285. https://doi.org/10.3390/su15032285

Song, L., Cherrett, T., McLeod, F., & Guan, W. (2009). *Addressing the Last Mile Problem*. https://doi.org/10.3141/2097-02

Sorooshian, S. (2026). Crowdshipping for last-mile delivery in the sharing economy and crowdsourced quick commerce. *The TQM Journal*, *38*(11), 17–35. https://doi.org/10.1108/TQM-07-2025-0411

Sxoinaraki, E., & Panou, K. (2017). Innovative business models for exploiting green vehicle potential in urban logistics. *Transportation Research Procedia, World Conference on Transport Research - WCTR 2016 Shanghai. 10-15 July 2016*, *25*, 954–964. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.470

Taniguchi, E., Thompson, R. G., Yamada, T., & van Duin, R. (2001). *City logistics: Network modelling and intelligent transport systems*. Emerald Group Publishing Limited.

Tapia, R. J., Kourounioti, I., Thoen, S., de Bok, M., & Tavasszy, L. (2023). A disaggregate model of passenger-freight matching in crowdshipping services. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, *169*, 103587. https://doi.org/10.1016/j.tra.2023.103587

Tsakalidis, A., Krause, J., Julea, A., Peduzzi, E., Pisoni, E., & Thiel, C. (2020). Electric light commercial vehicles: Are they the sleeping giant of electromobility? *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *86*, 102421. https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102421

UN. Secretary-General & World Commission on Environment and Development (Eds.). (1987). *Report of the World Commission on Environment and Development: Note*. UN.

https://digitallibrary.un.org/record/139811

United Nations General Assembly. (2005). *2005 World Summit Outcome* ((A/RES/60/1)). https://www.globalr2p.org/wp-content/uploads/2019/09/UNGA-60-1-WSOD-En.pdf

Van Duin, J. H. R. (Ron), Kin, B. (Bram), Quak, H. J. (Hans), Ploos Van Amstel, W. (Walther), & Anand, N. R. (Nilesh). (2026). Sustainable city logistics. Em *Advances in Transport Policy and Planning* (Vol. 17, pp. 221–313). Elsevier. https://doi.org/10.1016/bs.atpp.2026.01.001

Vasiutina, H., Szarata, A., & Rybicki, S. (2021). Evaluating the Environmental Impact of Using Cargo Bikes in Cities: A Comprehensive Review of Existing Approaches. *Energies*, *14*(20), 6462. https://doi.org/10.3390/en14206462

Wehbi, L., Bektaş, T., & Iris, Ç. (2022). Optimising vehicle and on-foot porter routing in urban logistics. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *109*, 103371. https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103371

Williams, R. I., Clark, L. A., Clark, W. R., & Raffo, D. M. (2021). Re-examining systematic literature review in management research: Additional benefits and execution protocols. *European Management Journal*, *39*(4), 521–533. https://doi.org/10.1016/j.emj.2020.09.007

Yang, H., Landes, H., & Chow, J. Y. J. (2024). A large-scale analytical residential parcel delivery model evaluating greenhouse gas emissions, COVID-19 impact, and cargo bikes. *International Journal of Transportation Science and Technology*, *15*, 136–154. https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2023.08.002

Zhang, M., & Cheah, L. (2025). A framework to organize public transport-based crowdshipping. *Journal of Public Transportation*, *27*, 100133. https://doi.org/10.1016/j.jpubtr.2025.100133

Zhang, R., Xiao, J., & Heinitz, F. (2025). Urban case studies on optimized truck-drone last-mile distribution. *21st International Conference on Transport Science*, *83*, 19–27. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2025.02.005

Apêndice I – Tabela de extração de dados

Tabela 4 - Extração de dados dos artigos incluídos

Título do artigo	Ano de publicação	Autores	Objetivo do estudo	Estratégia de investigação		Alternativa/solução de entrega analisada	Impactos ambientais	Valores quantitativos extraídos	Localização geográfica
				Abordagem	Tipo de estudo				
A disaggregate model of passenger-freight matching in crowdshipping services	2023	Tapia, Rodrigo J.; Kourounioti, Ioanna; Thoen, Sebastian; de Bok, Michiel; Tavasszy, Lori	Propor um modelo *agent-based*, para simular a procura e estimar a oferta de serviços de *crowdshipping*	Quantitativa	Modelação e simulação (modelo *agent-based*, aplicado a um estudo de caso e simulação de 12 cenários)	*Crowdshipping*	Emissões de CO_2 e quilometragem percorrida (aumento, devido ao uso de automóveis)	Aumento dos quilómetros percorridos (entre 14% e 30%) e das emissões (de até 16%)	Países Baixos (Haia)
A framework to organize public transport-based crowdshipping	2025	Zhang, Meijing; Cheah, Lynette	Fornecer uma estrutura para implementar o *crowdshipping* com recurso a transportes públicos e cacifos, para as serem eficientes e sustentáveis	Quantitativa	Modelação, otimização e simulação (com análise de cenários) (aplicado a estudo de caso real)	*Crowdshipping* (com passageiros de transportes públicos e cacifos)	Quilometragem percorrida pelos veículos e emissões (redução de ambos)	Redução das emissões (de até 30%) e dos quilómetros percorridos, com o redireccionamento de 9% das encomendas para os *crowdshippers*.	Singapura
A large-scale analytical residential parcel delivery model evaluating greenhouse gas emissions, COVID-19 impact, and cargo bikes	2024	Yang, Hai; Landes, Hector; Chow, Joseph Y.J.	Propor modelo para prever volumes de entrega de encomendas, distância percorrida e analisar impactos sociais e ambientais	Quantitativa	Modelação e simulação (aplicado a estudo de caso real)	Bicicletas de carga elétricas	Quilometragem percorrida pelos veículos e emissões de GEE (redução de ambos)	Redução dos quilómetros percorridos (de 10,69%) e das emissões de GEE (de 2,26 toneladas/dia), através do uso de bicicletas	EUA (Nova Iorque)
A simulative assessment of	2025	Buerklen, Anna;	Avaliar o contributo, ao nível da	Quantitativa	Simulação de cenários	Soluções de distribuição	Emissões de CO_2 (redução)	Redução das emissões (em 55% até 2030)	Alemanha (Hamburgo)

collaborative last mile delivery solutions		Adeniran, Ibraheem; Kehrt, Carina	sustentabilidade, de soluções de entrega colaborativas e perceber quais os seus impactos			colaborativas (*microhubs*, estações de entregas e bicicletas de carga)			
A sustainable crowd shipping model using public transport for low-carbon urban logistics	2025	Naganawa, Hisatoshi; Hirata, Enna; Thompson, Russell G.	Criar um sistema de entregas multimodal colaborativo e avaliar o seu contributo para a redução dos custos e das emissões	Quantitativa	Modelação, otimização e simulação de cenários (aplicado a estudo de caso real)	*Crowdshipping* (com o uso de transportes públicos e cacifos)	Emissões de CO_2 (redução)	Redução das emissões (cerca de 80%), no cenário mais favorável e nos restantes cenários (cerca de 54%)	Japão (Osaka)
Assessing the sustainability of last-mile distribution strategies to manage expedited shipping with dynamic and stochastic demand	2025	Pahwa, Anmol; Jaller, Miguel	Avaliar o desempenho de diversas estratégias de distribuição ao nível do tripé da sustentabilidade	Quantitativa	Modelação, otimização e simulação (análise de cenários) (Monte Carlo)	Diversas estratégias de distribuição (camiões e carrinhas elétricos e a gasóleo, camiões ligeiros, bicicletas de carga elétricas, carros de passageiros, robôs, drones)	Emissões de CO_2, CO, NO_x e material particulado (aumento/redução consoante os diferentes cenários)	Redução das emissões (85g de CO_2, 0,04g de CO, 0,30g de NO_x e 0,00g de material particulado), através do uso de frotas de camiões e carrinhas elétricas que é o cenário mais favorável	EUA (Los Angeles)
Autonomous Delivery Vehicles in Two-Echelon Routing for Sustainable Last-Mile Logistics	2025	Moradi, Nima; Kayvanfar, Vahid; Baldacci, Roberto	Avaliar sistema de entregas de dois níveis com veículos elétricos, autónomos e robôs quanto à sustentabilidade e eficiência	Quantitativa	Modelação e otimização	Veículos elétricos, veículos autónomos e robôs de entrega (no segundo nível de um sistema de dois níveis)	Emissões de CO_2 (redução)	Redução das emissões (cerca de 2,69% 3 27,26%), para veículos com aumento de autonomia de 5,56% e de 11,11%, respetivamente.	Não aplicável
Characterizatio n of urban distribution networks with light electric freight vehicles	2023	Díaz-Ramírez, Jenny; Zazueta-Nassif, Sebastián; Galarza-Tamez, Roberto; Prato-Sánchez, Daniel;	Avaliar, quanto aos custos e às emissões de GEE, a substituição, total ou parcial, de veículos movidos a combustíveis fósseis por bicicletas e triciclos elétricos	Quantitativa	Modelação e otimização (aplicado a estudo de caso real)	Bicicletas e triciclos elétricos	Emissões de CO_2, N_2O e CH_4 (redução de todos)	Redução das emissões de GEE (de cerca de 95%), com a substituição	Colômbia (Bogotá)

		Huertas, Jose I.							
Collaborative distribution network design for sustainable parcel deliveries: A strategic modelling approach	2025	Arevalo-Ascanio, Rafael; Meyer, Annelies De; Gevaers, Roel; Guisson, Ruben; Verbelen, Geert; Dewulf, Wouter	Avaliar uma estratégia de distribuição de última milha que integra a colaboração entre operadores	Quantitativa	Modelação e otimização (aplicado a estudo de caso real)	Redes de distribuição colaborativas	Emissões de CO_2 (redução)	Redução das emissões (de 11,2%, 25,08%, 30,5%, 35,3% e 35,5%), aumentando o número de *hubs* a cada cenário, comparando com o cenário base.	Bélgica
Electric light commercial vehicles: Are they the sleeping giant of electromobility?	2020	Tsakalidis, Anastasios; Krause, Jette; Julea, Andreea; Peduzzi, Emanuela; Pisoni, Enrico; Thiel, Christian	Investigar o uso de veículos comerciais ligeiros elétricos e o seu potencial e cobrir lacuna acerca de políticas de apoio à implementação	Quantitativa	Avaliação económico-ambiental - TCO (Custo total de propriedade) e emissões de poluentes (com análise de cenários)	Veículos comerciais elétricos	Emissões e concentração de CO_2, NO_x e material particulado (redução)	Redução das emissões de CO_2 (de 3%), de NO_x (de 5%) e de material particulado (de 3%) quanto às emissões totais do transporte rodoviário	Vários países da União Europeia
Electrifying light commercial vehicles for last-mile deliveries: Environmental and economic perspectives	2023	Lal, Apoorv; Renaldy, Thomas; Breuning, Larissa; Hamacher, Thomas; You, Fengqi	Avaliar diferentes tipos de veículos usados nas operações de *last-mile delivery*, quanto aos custos e aos impactos ambientais	Quantitativa	Avaliação económico-ambiental - LCA (Avaliação do ciclo de vida) e TCO (Custo total de propriedade) (com análise de cenários)	Veículos de combustão interna, veículos elétricos a bateria e veículos elétricos a hidrogénio	Emissões de GEE e GWP (redução de ambos)	Aumento dos impactos ambientais (em 20-42%) para veículos a hidrogénio, quando este não é produzido com energia renovável	EUA (Califórnia) e Alemanha
Environmental and energy performance of integrated passenger–freight transport	2023	Bruzzone, Francesco; Cavallaro, Federico; Nocera, Silvio	Investigar o desempenho ambiental e energético de um sistema de transporte misto de carga e passageiros	Quantitativa	Simulação (com análise de cenários) (aplicado a estudo de caso real)	Transporte misto de passageiros e carga	Consumo energético e emissões de gases (redução de ambos, em alguns dos cenários analisados)	Redução do consumo energético (de até 63%) e das emissões de GEE (de até 60%)	Sérvia (Zrenjanin)

Environmental and operational impact of freight urban delivery: in-store, home and locker	2025	Jiménez, Pilar; Garrido, Laura; Gomez, Juan; Vassallo, José Manuel	Avaliar o desempenho de diversas estratégias de entrega (comparando loja física e *e-commerce*, com e sem centro de distribuição intermédio)	Quantitativa	Modelação e simulação (Monte Carlo) (aplicado a estudo de caso real)	Diferentes estratégias de entrega (loja física e *e-commerce*, com e sem centro de distribuição intermédio)	Emissões de gases com efeito de estudo e quilómetros percorridos pelos veículos (redução de ambos)	Redução dos quilómetros percorridos (em cerca de 92% e 80%) e dos impactos ambientais (em cerca de 82-89% e 65-80%), para entregas em loja	Espanha (Madrid)
Evaluating Cargo Bike Delivery Applications in Urban Logistics: The Case of Zagreb	2025	Ljubotina, Leonid; Ševrović, Marko; Pirdavani, Ali; Jovanović, Bojan	Comparar dois modelos de entrega (convencional e de duas etapas, com o uso de bicicletas de carga na segunda etapa)	Quantitativa	Modelação e simulação (aplicado a estudo de caso real)	Bicicletas de carga	Emissões de CO_2 (redução)	Redução das emissões de CO_2 (de cerca de 40%) (emissões de CO_2 com o modelo convencional são de 7,98kg e com o modelo que integra bicicletas de carga são de 4,82kg).	Croácia (Zagreb)
Evaluation of cargo bike program for parcel deliveries in a medium-sized city	2025	Galkin, Andrii; Švadlenka, Libor; Vrba, Radek; Oliveira, Leise Kelli de	Avaliar a viabilidade, ambiental e económica, de um serviço de entregas de bicicletas de carga elétricas	Quantitativa	Modelação, otimização e simulação (aplicado a um estudo de caso real)	Bicicletas de carga elétricas	Consumo de energia (redução)	Não aplicável (sem valores quantificáveis quanto aos impactos ambientais)	República Checa (Pardubice)
Express shipments with autonomous robots and public transportation	2024	Ermağan, Umut; Yıldız, Barış; Salman, F. Sibel	Analisar a viabilidade de um modelo que combina robôs autónomos com transportes públicos	Quantitativa	Modelação, otimização e simulação (com dados reais)	Robôs autónomos + transportes públicos	Quilometragem percorrida pelos veículos, tráfego e emissões (redução)	Redução dos quilómetros percorridos (de 85,71%) e das emissões (de 84-85%) (para uma entrega por viagem, sendo que para várias entregas por viagem a redução dos quilómetros seria de cerca de 84,88% e das emissões de cerca de 84-86%) Redução das externalidades negativas (em cerca de 80%)	Turquia
Feasibility of crowdshipping for outlier parcels in last-mile delivery	2025	Cebeci, Merve Seher; de Bok, Michiel; Tapia, Rodrigo; Nadi, Ali;	Perceber quais as encomendas que os prestadores de serviços logísticos devem considerar para entrega via *crowdshipping*,	Quantitativa	Modelação e simulação (aplicado a estudo de caso real)	*Crowdshipping*	Emissões de CO_2 (aumento quando o modo de transporte usado são os automóveis e redução quando são usados transportes	Com *crowdshipping*, para compensação de 0,1€/km as emissões seriam de 3,38 toneladas e para 1€ seriam de 0,23 toneladas Com entregas convencionais, para	Países Baixos

		Tavasszy, Lóránt	através de uma regra relacionada com os custos e utilizando um modelo de simulação				públicos e bicicletas)	compensação de 0,1€/km as emissões seriam de 2,87 toneladas e para 1€ seriam de 4,17 toneladas	
Hydrogen cargo bikes as a data-driven solution for last-mile decarbonization	2025	Capkin, Sevket Oguz Kagan	Comparar o desempenho e avaliar a viabilidade das bicicletas de carga a hidrogénio quando comparadas às elétricas a bateria e às *vans* movidas a combustíveis fósseis	Quantitativa	Modelação e simulação (aplicado a estudo de caso real)	Bicicletas de carga movidas a hidrogénio	Quilometragem percorrida pelos veículos, consumo de energia e emissões de CO_2 (redução)	Para bicicletas movidas a hidrogénio, não há emissões de CO_2 e há consumo de 4,04kg de combustível Para bicicletas elétricas, não há emissões de CO_2 e há consumo de 121,25kWh Para carrinhas a gasóleo há emissões de 135,40kg de CO_2 e consumo de 50,52l de combustível	Itália (Roma)
Hyperconnected urban fulfillment and delivery	2021	Kim, Nayeon; Montreuil, Benoit; Klibi, Walid; Kholgade, Nitish	Avaliar o desempenho e os impactos de um sistema hiperconectado de logística urbana aplicado a entregas de última milha	Quantitativa	Modelação e simulação (com análise de cenários) (aplicado a estudo de caso)	Sistema hiperconectado de logística urbana (com base em *internet* física)	Emissões de CO_2, NO_2, SO_2 e de material particulado (redução)	Redução das emissões GEE e de material particulado (de cerca de 30%)	Não aplicável
Integrating first-mile pickup and last-mile delivery on shared vehicle routes for efficient urban e-commerce distribution	2020	Bergmann, Felix M.; Wagner, Stephan M.; Winkenbach, Matthias	Estudar os possíveis ganhos resultantes da integração das operações de primeira e de última milha	Quantitativa	Modelação e otimização (com análise de cenários) (aplicado a estudo de caso real)	Estratégia de integração de operações de primeira e última milha	Emissões e tráfego (redução de ambos)	Redução das emissões e do tráfego (de até 16%)	Índia (Bengaluru)
Integration of UAVs with public transit for delivery: Quantifying system benefits and policy implications	2024	Cui, Shaohua; Yang, Ying; Gao, Kun; Cui, Heqi; Najafi, Arsalan	Estudar a integração de drones com veículos de transporte público, tendo em vista a redução das emissões e do congestionamento e o aumento das receitas	Quantitativa	Modelação (com análise de cenários) (aplicado a estudo de caso real)	Drones + transportes públicos (autocarros, comboios e elétricos)	Emissões de carbono e tráfego (redução das emissões e aumento do tráfego)	Redução das emissões (de 0,171 toneladas/hora o que equivale a uma redução de 811,40 toneladas/ano) e aumento dos níveis de tráfego (de 3,7%)	China (Pequim)

Investigating the use of microhubs and crowdshipping for last mile delivery	2020	Ballare, Sudheer; Lin, Jane	Avaliar o desempenho de um sistema de entregas que utiliza *microhubs* e *crowdshipping* e comparar com o sistema de entregas tradicional	Quantitativa	Modelação e simulação (com análise de cenários)	*Microhubs* + *crowdshipping*	Quilometragem percorrida pelos veículos e consumo de combustível (redução)	Redução dos quilómetros percorridos (de cerca de 50%) e do consumo de combustível (de cerca de 2/3)	Não aplicável
Life-cycle analysis of last-mile parcel delivery using autonomous delivery robots	2023	Lemardelé, Clément; Pinheiro Melo, Sofia; Cerdas, Felipe; Herrmann, Christoph; Estrada, Miquel	Analisar o ciclo de vida de várias estratégias de distribuição e avaliar o desempenho ambiental de um sistema de entregas de dois níveis (veículos pesados e robôs autónomos)	Quantitativa	Avaliação ambiental (LCA - avaliação do ciclo de vida), modelação e simulação (Monte Carlo)	Robôs autónomos (sistema de dois níveis, com veículos pesados no primeiro nível)	GWP (aumento/redução dependendo da fase do ciclo de vida)	Redução do GWP (em 59% e 43%, Barcelona e Hamburgo, respetivamente), para veículos comerciais ligeiros elétricos Redução do consumo energético (em mais de 25%), com o uso de robôs	Alemanha (Hamburgo) e Espanha (Barcelona)
Moving-micro hubs: Redefining last-mile logistics with autonomous hub vehicles (AHVs) and delivery robots (ADRs)	2025	Montero-Vega, Mariana; Estrada, Miquel	Desenvolver um modelo de entregas a dois níveis, composto por *microhubs* móveis e robôs autónomos de entrega	Quantitativa	Modelação e otimização (com análise de cenários) (aplicado a estudo de caso)	Veículos autónomos (*microhubs* móveis) + robôs autónomos	GWP (redução)	Não aplicável (sem valores quantificáveis quanto aos impactos ambientais)	Espanha (L'Hospitalet de Llobregat)
Multi-objective optimization for two-echelon joint delivery location routing problem considering carbon emission under online shopping	2023	Du, Jianhui; Wang, Xu; Wu, Xin; Zhou, Fuli; Zhou, Lin	Propor um modelo novo de entregas conjuntas que promova a colaboração entre empresas e a partilha de recursos entre si	Quantitativa	Modelação e otimização (multiobjetivo)	Entrega conjunta (em dois níveis e múltiplos depósitos) (modelo colaborativo)	Emissões de carbono (redução)	Redução das emissões de carbono (de 308,66 kg para 288,23 kg)	China (Chongqing)
Multi-objective optimization of two-echelon	2025	Jin, Zhicheng; Lu, Miaojia; Li, Xiangyong;	Propor um modelo de entregas de dois níveis, que inclui	Quantitativa	Modelação e otimização (multiobjetivo)	Veículos autónomos de entrega + veículos elétricos de duas	Emissões de GEE (redução)	Redução das emissões de GEE (de cerca de 30,62%)	China (Xangai)

delivery with autonomous delivery vehicles and electric two-wheelers		Zhang, Shu; Hsu, Shu-Chien	veículos autónomos de entrega e veículos elétricos de duas rodas			rodas (sistema de dois níveis)			
Optimising vehicle and on-foot porter routing in urban logistics	2022	Wehbi, Lais; Bektaş, Tolga; Iris, Çağatay	Propor e estudar um novo modelo de distribuição que integra carregadores a pé (para transporte de carga) com carrinhas (*vans*)	Quantitativa	Modelação e otimização (aplicado a estudo de caso)	Carrinhas (*vans*) de carga + carregadores a pé (para transporte da carga)	Emissões de CO_2 (redução)	Redução das emissões de CO_2 (até 89%)	Reino Unido (Londres)
Optimizing Two-Echelon Logistics Network for Urban Logistics by LRP Heuristics with integrated Microscopic Transport Simulation	2025	Deineko, Elija; Adeniran, Ibraheem O.; Thaller, Carina; Liedtke, Gernot	Criar uma heurística para otimizar o problema de encaminhamento de localização de um sistema de distribuição de dois níveis que utiliza bicicletas de carga e *microhubs*.	Quantitativa	Modelação, otimização e simulação (aplicado a um estudo de caso real)	Bicicletas de carga + *microhubs*	Quilometragem percorrida pelos veículos e emissões de CO_2 (aumento)	Aumento das emissões de CO_2 (de 2,71%) e dos quilómetros percorridos (de 2,7%)	Alemanha (Berlim)
The environmental impact of fast delivery B2C e-commerce in outbound logistics operations: A simulation approach	2022	Pereira Marcilio Nogueira, Geísa; José de Assis Rangel, João; Rossi Croce, Paulo; Almeida Peixoto, Túlio	Avaliar de que forma diferentes níveis de consolidação e diferentes graus de flexibilidade quanto aos prazos das entregas influenciam a sustentabilidade do serviço de entrega.	Quantitativa	Modelação e simulação (com análise de cenários)	Diferentes soluções (com diversos níveis de consolidação e graus de flexibilidade quanto ao tempo de entrega)	Quilometragem percorrida pelos veículos (redução)	Não aplicável (sem valores quantificáveis quanto aos impactos ambientais)	Não aplicável
The impact of optimal parcel locker locations on costs and the environment	2021	Peppel, Marcel; Spinler, Stefan	Desenvolver redes de cacifos fixos para encomendas, de forma a minimizar os custos de entrega e recolha e as emissões de CO_2	Quantitativa	Modelação e otimização (multiobjetivo) (aplicado a estudo de caso real múltiplo)	Redes de cacifos fixos	Emissões de CO_2 (redução em áreas urbanas e aumento em zonas mais afastadas)	Redução das emissões (de até 2,5%) em áreas urbanas e aumento (de até 4,6%) em áreas mais distantes	País europeu

Towards a new last-mile delivery system: Cost and energy-optimized robot and van allocation	2025	Klar, Robert; Arvidsson, Niklas; Rudmark, Daniel	Avaliar o potencial ambiental e económico de uma alternativa de entrega conjunta composta por robôs autónomos e *vans*	Qualitativa	Modelação e otimização (aplicado a estudo de caso real)	Robôs autónomos + carrinhas (*vans*)	Consumo energético (redução)	Redução do consumo energético (de cerca de 42%)	Não aplicável (apesar de ter por base as informações obtidas num projeto na Suécia)
Traffic impact on last mile parcel delivery with cargo bikes	2023	Ritzer, Philip; Geischberger, Jakob; Adeniran, Ibraheem O.; Thaller, Carina	Avaliar qual o impacto do tráfego e os efeitos da colaboração na entrega de encomendas utilizando bicicletas de carga e comparar com entrega convencional	Quantitativa	Modelação e simulação (com dados reais)	Bicicletas de carga	Emissões de CO_2 (redução)	Para bicicletas de carga são emitidos 15kg, 18kg, 19kg e 21kg de CO_2 (16kg, 18kg, 19kg e 21kg em caso de colaboração) e para carrinhas são emitidos 130kg, 138kg, 143kg e 157kg (118kg, 121kg, 124kg e 131kg em caso de colaboração) para nenhum, pouco, médio ou elevado nível de tráfego, respetivamente	Alemanha (Hamburgo)
Urban case studies on optimized truck-drone last-mile distribution	2025	Zhang, Ruiyang; Xiao, Junfeng; Heinitz, Florian	Criar e avaliar uma heurística eficiente para resolver o problema do sistema de entregas composto por camião e drones	Quantitativa	Modelação e simulação (com dados reais)	Camião + drones	Emissões de CO_2 (redução)	Redução das emissões de CO_2 (de 34% a 44%)	Alemanha (Erfurt, Aachen), França (Saint-Denis), China (Xangai, Suzhou)

Apêndice II – Checklist de avaliação da qualidade

Tabela 5 - Checklist de avaliação da qualidade dos artigos analisados

Critérios	Artigos						
	A disaggregate model of passenger-freight matching in crowdshipping services	A framework to organize public transport-based crowdshipping	A large-scale analytical residential parcel delivery model evaluating greenhouse gas emissions, COVID-19 impact, and cargo bikes	A simulative assessment of collaborative last mile delivery solutions	A sustainable crowd shipping model using public transport for low-carbon urban logistics	Assessing the sustainability of last-mile distribution strategies to manage expedited shipping with dynamic and stochastic demand	Autonomous Delivery Vehicles in Two-Echelon Routing for Sustainable Last-Mile Logistics
1. O objetivo do estudo é apresentado de forma clara.	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
2. O contexto e o problema são descritos de forma clara.	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
3. As fontes de dados e as variáveis são identificadas de forma clara.	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
4. Os pressupostos, os parâmetros e as restrições são descritos de forma clara.	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
5. O tipo de modelo usado (matemático, otimização, simulação, etc.) é devidamente explicitado.	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
6. A estrutura do modelo é descrita de forma compreensível.	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
7. O modelo é adequado ao objetivo do estudo.	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
8. Existe validação interna ou externa (verificação, sensibilidade, comparação, etc.) do modelo.	SIM	SIM	PARCIAL	PARCIAL	SIM	SIM	PARCIAL
9. As métricas de desempenho e os resultados são apresentados de forma clara e coerente.	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
10. As limitações são identificadas.	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
11. O estudo pode ser replicado.	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
12. Os resultados podem ser usados para síntese ou comparação posterior.	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Avaliação global:	BOM	BOM	BOM	BOM	BOM	BOM	BOM

Critérios	Artigos						
	Characterization of urban distribution networks with light electric freight vehicles	Collaborative distribution network design for sustainable parcel deliveries: A strategic modelling approach	Electric light commercial vehicles: Are they the sleeping giant of electromobility?	Electrifying light commercial vehicles for last-mile deliveries: Environmental and economic perspectives	Environmental and energy performance of integrated passenger–freight transport	Environmental and operational impact of freight urban delivery: in-store, home and locker	Evaluating Cargo Bike Delivery Applications in Urban Logistics: The Case of Zagreb
1. O objetivo do estudo é apresentado de forma clara.	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
2. O contexto e o problema são descritos de forma clara.	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
3. As fontes de dados e as variáveis são identificadas de forma clara.	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
4. Os pressupostos, os parâmetros e as restrições são descritos de forma clara.	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
5. O tipo de modelo usado (matemático, otimização, simulação, etc.) é devidamente explicitado.	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
6. A estrutura do modelo é descrita de forma compreensível.	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
7. O modelo é adequado ao objetivo do estudo.	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
8. Existe validação interna ou externa (verificação, sensibilidade, comparação, etc.) do modelo.	PARCIAL	PARCIAL	SIM	SIM	SIM	PARCIAL	PARCIAL
9. As métricas de desempenho e os resultados são apresentados de forma clara e coerente.	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
10. As limitações são identificadas.	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
11. O estudo pode ser replicado.	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
12. Os resultados podem ser usados para síntese ou comparação posterior.	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Avaliação global:	BOM	BOM	BOM	BOM	BOM	BOM	BOM

Critérios	Artigos						
	Evaluation of cargo bike program for parcel deliveries in a medium-sized city	Express shipments with autonomous robots and public transportation	Feasibility of crowdshipping for outlier parcels in last-mile delivery	Hydrogen cargo bikes as a data-driven solution for last-mile decarbonization	Hyperconnected urban fulfillment and delivery	Integrating first-mile pickup and last-mile delivery on shared vehicle routes for efficient urban e-commerce distribution	Integration of UAVs with public transit for delivery: Quantifying system benefits and policy implications
1. O objetivo do estudo é apresentado de forma clara.	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
2. O contexto e o problema são descritos de forma clara.	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
3. As fontes de dados e as variáveis são identificadas de forma clara.	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
4. Os pressupostos, os parâmetros e as restrições são descritos de forma clara.	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	PARCIAL
5. O tipo de modelo usado (matemático, otimização, simulação, etc.) é devidamente explicitado.	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	PARCIAL
6. A estrutura do modelo é descrita de forma compreensível.	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
7. O modelo é adequado ao objetivo do estudo.	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
8. Existe validação interna ou externa (verificação, sensibilidade, comparação, etc.) do modelo.	SIM	SIM	PARCIAL	SIM	PARCIAL	SIM	PARCIAL
9. As métricas de desempenho e os resultados são apresentados de forma clara e coerente.	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
10. As limitações são identificadas.	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	PARCIAL
11. O estudo pode ser replicado.	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	PARCIAL
12. Os resultados podem ser usados para síntese ou comparação posterior.	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Avaliação global:	BOM	BOM	BOM	BOM	BOM	BOM	MODERADO

Critérios	Artigos						
	Investigating the use of microhubs and crowdshipping for last mile delivery	Life-cycle analysis of last-mile parcel delivery using autonomous delivery robots	Moving-micro hubs: Redefining last-mile logistics with autonomous hub vehicles (AHVs) and delivery robots (ADRs)	Multi-objective optimization for two-echelon joint delivery location routing problem considering carbon emission under online shopping	Multi-objective optimization of two-echelon delivery with autonomous delivery vehicles and electric two-wheelers	Optimising vehicle and on-foot porter routing in urban logistics	Optimizing Two-Echelon Logistics Network for Urban Logistics by LRP Heuristics with integrated Microscopic Transport Simulation
1. O objetivo do estudo é apresentado de forma clara.	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
2. O contexto e o problema são descritos de forma clara.	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
3. As fontes de dados e as variáveis são identificadas de forma clara.	PARCIAL	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
4. Os pressupostos, os parâmetros e as restrições são descritos de forma clara.	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
5. O tipo de modelo usado (matemático, otimização, simulação, etc.) é devidamente explicitado.	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
6. A estrutura do modelo é descrita de forma compreensível.	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
7. O modelo é adequado ao objetivo do estudo.	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
8. Existe validação interna e/ou externa (verificação, sensibilidade, comparação, etc.) do modelo.	NÃO	SIM	PARCIAL	SIM	SIM	SIM	SIM
9. As métricas de desempenho e os resultados são apresentados de forma clara e coerente.	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
10. As limitações são identificadas.	SIM	SIM	SIM	PARCIAL	SIM	SIM	SIM
11. O estudo pode ser replicado.	PARCIAL	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
12. Os resultados podem ser usados para síntese ou comparação posterior.	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Avaliação global:	MODERADO	BOM	BOM	BOM	BOM	BOM	BOM

Critérios	Artigos				
	The environmental impact of fast delivery B2C e-commerce in outbound logistics operations: A simulation approach	The impact of optimal parcel locker locations on costs and the environment	Towards a new last-mile delivery system: Cost and energy-optimized robot and van allocation	Traffic impact on last mile parcel delivery with cargo bikes	Urban case studies on optimized truck-drone last-mile distribution
1. O objetivo do estudo é apresentado de forma clara.	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
2. O contexto e o problema são descritos de forma clara.	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
3. As fontes de dados e as variáveis são identificadas de forma clara.	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
4. Os pressupostos, os parâmetros e as restrições são descritos de forma clara.	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
5. O tipo de modelo usado (matemático, otimização, simulação, etc.) é devidamente explicitado.	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
6. A estrutura do modelo é descrita de forma compreensível.	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
7. O modelo é adequado ao objetivo do estudo.	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
8. Existe validação interna ou externa (verificação, sensibilidade, comparação, etc.) do modelo.	SIM	SIM	PARCIAL	PARCIAL	PARCIAL
9. As métricas de desempenho e os resultados são apresentados de forma clara e coerente.	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
10. As limitações são identificadas.	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
11. O estudo pode ser replicado.	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
12. Os resultados podem ser usados para síntese ou comparação posterior.	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Avaliação global:	BOM	BOM	BOM	BOM	BOM