

UNIVERSIDADE PAULISTA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTU SENSU* EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO

**ESTRATÉGIAS DE SUSTENTABILIDADE NA LOGÍSTICA DE ÚLTIMA MILHA NA
REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO: UMA ABORDAGEM BASEADA EM
SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS**

FABRÍCIO HENRIQUE DO NASCIMENTO DA SILVA

SÃO PAULO

2026

UNIVERSIDADE PAULISTA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTU SENSU* EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO

**ESTRATÉGIAS DE SUSTENTABILIDADE NA LOGÍSTICA DE ÚLTIMA MILHA NA
REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO: UMA ABORDAGEM BASEADA EM
SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Paulista – UNIP, para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Feni Dalano Roosevelt Agostinho

Área de concentração: Sustentabilidade em Sistemas de Produção

Linha de pesquisa: Avanços em Produção Mais Limpa e Ecologia Industrial

Projeto de Pesquisa: Planejamento e gestão em busca de cadeias de produção mais sustentáveis: processo, produto, consumo e descarte.

FABRÍCIO HENRIQUE DO NASCIMENTO DA SILVA

SÃO PAULO

2026

Ficha catalográfica

Silva, Fabrício Henrique do Nascimento da.

Estratégias de sustentabilidade na logística de última milha na região Metropolitana de São Paulo: uma abordagem baseada em simulação de cenários / Fabrício Henrique do Nascimento da Silva. – 2026.

128 f.: il. color. + CD-ROM.

Dissertação de Mestrado Apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Paulista, São Paulo, 2026.

Área de concentração: Sustentabilidade em Sistemas de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Feni Dalano Roosevelt Agostinho.

1. Logística de última milha. 2. Sustentabilidade. 3. *Triple Bottom Line*. 4. Simulação de cenários. 5. Região Metropolitana de São Paulo . I. Agostinho, Feni Dalano Roosevelt (orientador). II. Título.

Ficha elaborada pelo Bibliotecário Rodney Eloy CRB8-6450

FABRÍCIO HENRIQUE DO NASCIMENTO DA SILVA

**ESTRATÉGIAS DE SUSTENTABILIDADE NA LOGÍSTICA DE ÚLTIMA MILHA NA
REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO: UMA ABORDAGEM BASEADA EM
SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Paulista – UNIP, para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Data de Aprovação: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

_____/_____/____/

Prof. Orientador Dr. Feni Dalano Roosevelt Agostinho - Universidade Paulista - UNIP

_____/_____/____/

Prof. Dr. Fábio Sevegnani - Universidade Paulista - UNIP

_____/_____/____/

Prof. Dr. Marcell Mariano Corrêa Maceno - Universidade Federal do Paraná - UFPR

DEDICATÓRIA

*Dedico está Trabalho ao meu irmão
Fernando pelo incentivo e apoio.*

Aos meus pais,

Maria Lúcia do Nascimento (in memorian)

Severino Henrique da Silva (in memorian)

AGRADECIMENTO

Agradeço ao meu orientador, Feni Dalano Roosevelt Agostinho, pelos ensinamentos, pela dedicação e pela confiança depositada ao longo desta jornada, expresso minha sincera gratidão pela coragem e generosidade de aceitar o desafio de conduzir este trabalho, assumindo a orientação no decorrer do processo. Sua experiência, comprometimento e valiosas contribuições foram fundamentais para o amadurecimento desta pesquisa e para a concretização deste estudo. Muito obrigado pelo apoio, pela paciência e pela orientação.

À Profa. Dra. Sivanilza Teixeira Machado, minha profunda gratidão por ter acreditado em mim, muitas vezes antes mesmo que eu acreditasse plenamente em minhas próprias capacidades. Sua confiança, apoio e incentivo foram decisivos para que eu continuasse avançando diante dos desafios encontrados ao longo desta caminhada.

Ao Prof. Dr. João Gilberto Mendes dos Reis, expresso minha sincera gratidão pela confiança depositada em mim ao abrir as portas do mestrado e proporcionar a oportunidade de ingressar nesta importante etapa de minha formação acadêmica. Agradeço, igualmente, por ter sido meu orientador inicial, compartilhando conhecimentos, experiências e direcionamentos fundamentais para o desenvolvimento desta trajetória. Sua acolhida, incentivo e apoio foram decisivos para que este sonho se tornasse realidade.

Aos Profs. Drs. Marcell Mariano Corrêa Maceno e Fábio Sevegnani, registro meus sinceros agradecimentos por aceitarem o convite para compor a banca examinadora desta dissertação. Suas valiosas observações, críticas construtivas e sugestões contribuíram significativamente para o amadurecimento e o aprimoramento deste trabalho.

Aos professores do Laboratório de Produção e Meio Ambiente (LaProMA), Prof. Dr. Biagio F. Giannetti, Profa. Dra. Cecilia M. Villas Bôas de Almeida e Prof. Dr. Fábio Sevegnani, meus sinceros agradecimentos pelo acolhimento, pelos ensinamentos compartilhados e pelo exemplo de dedicação à pesquisa científica. A convivência acadêmica e as contribuições de cada um foram fundamentais para o meu desenvolvimento intelectual e para a realização deste trabalho.

Ao Dr. Luiz Ghelmandi Netto, responsável técnico do Laboratório de Produção e Meio Ambiente (LaProMA), expresso meus sinceros agradecimentos pelo constante apoio, pela disponibilidade e pelo suporte prestado ao longo desta trajetória acadêmica.

À Secretaria do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção (PPGEP/UNIP), em especial à Aline Nascimento, pelo suporte prestado e pelo apoio administrativo oferecido ao longo de toda esta trajetória acadêmica. Sua atenção, disponibilidade e prontidão para auxiliar nas demandas do programa foram fundamentais para o desenvolvimento desta jornada.

Aos professores do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP) – Câmpus Suzano, Prof. Dr. Adriano Maniçoba da Silva, Prof. Dr. Enio Fernandes Rodrigues e Prof. Me. Wilson Yoshio Tanaka, expresso minha sincera gratidão pelos ensinamentos.

A todos os meus colegas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção (PPGEP), com quem tive o privilégio de conviver ao longo desta jornada, expresso minha sincera gratidão pelos momentos compartilhados, pelas trocas de experiências, pelos aprendizados.

Por fim, agradeço ao apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, fundamental para a concretização deste estudo.

RESUMO

A Logística de Última Milha (LUM) representa o segmento mais complexo, custoso e ambientalmente sensível da cadeia de suprimentos, especialmente em grandes centros urbanos. Na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), o crescimento do comércio eletrônico intensifica desafios relacionados a congestionamento, emissões de gases de efeito estufa, custos operacionais e riscos de segurança. Diante desse contexto, este estudo tem como objetivo avaliar a sustentabilidade de diferentes cenários logísticos de última milha aplicados à RMSP, considerando simultaneamente os capitais econômico, ambiental e social. Metodologicamente, iniciando-se por uma revisão sistemática da literatura para identificação dos principais desafios da LUM. Em seguida, são definidos indicadores-chave de desempenho (KPIs) para o cenário baseline e para cenários alternativos. Os pesos dos capitais são determinados com base na percepção de especialistas do setor logístico, utilizando-se da técnica Analytic Hierarchy Process (AHP). Posteriormente, realiza-se a simulação dos cenários e a análise comparativa dos indicadores de sustentabilidade, utilizando a análise de Monte Carlo. Os resultados parciais indicam a predominância do capital econômico (0,614) na estrutura decisória, seguido pelos capitais social (0,268) e ambiental (0,117), evidenciando *trade-offs* entre eficiência operacional e sustentabilidade. Dos quatro cenários identificados e avaliados comparativamente, o Cenário 3 (Eletrificação Parcial da Frota de Última Milha) é o mais sustentável, atingindo um Indicador Relativo de Sustentabilidade de (0,76), seguido pelo Cenário 1 (Expansão Massiva de Pontos de Coleta e Armários Inteligentes), (0,72), que também se mantém em patamar elevado. O Cenário 4 (Rotas Otimizadas e Pontos de Entrega Seguros) (0,67) apresenta desempenho superior ao Baseline (0,34), porém inferior aos dois primeiros cenários, destacando-se pela menor variabilidade dos resultados. Em contrapartida, o Cenário 2 (Implementação de Centros de Consolidação de Carga), (0,26) concentra o menor valor médio de, sendo a alternativa menos sustentável entre as avaliadas.

Palavras-chave: Logística de última milha; Sustentabilidade; Triple Bottom Line; Simulação de cenários; Região Metropolitana de São Paulo

ABSTRACT

Last Mile Logistics (LML) represents the most complex, costly, and environmentally sensitive segment of the supply chain, particularly in large urban centers. In the São Paulo Metropolitan Region (SPMR), the growth of e-commerce intensifies challenges related to traffic congestion, greenhouse gas emissions, operational costs, and security risks. In this context, this study aims to evaluate the sustainability of different last mile logistics scenarios applied to the SPMR, simultaneously considering economic, environmental, and social capitals. Methodologically, the research adopts a structured approach, beginning with a systematic literature review to identify the main challenges of LML. Subsequently, key performance indicators (KPIs) are defined for the baseline scenario and alternative scenarios. The weights of the sustainability capitals are determined based on the perception of logistics sector specialists using the *Analytic Hierarchy Process* (AHP) technique. Subsequently, scenario simulation and comparative analysis of sustainability indicators are carried out using *Monte Carlo* analysis. Partial results indicate the predominance of economic capital (0.614) in the decision-making structure, followed by social (0.268) and environmental (0.117) capitals, highlighting trade-offs between operational efficiency and sustainability. Among the four identified and evaluated scenarios, Scenario 3 is the most sustainable, achieving an S index of 0.77. The comparison among scenarios reveals clear differences in the behavior of the sustainability index S. Scenario 3 (0.77) presents the highest mean value, configuring itself as the best overall-performing alternative, followed by Scenario 1 (0.73), which also remains at a high level. Scenario 4 (0.68) performs better than the Baseline (0.34), although below the first two scenarios, standing out for the lower variability of results. In contrast, Scenario 2 (0.26) presents the lowest mean value, being the least sustainable alternative among those evaluated.

Keywords: Last mile logistics; Sustainability; *Triple Bottom Line*; Scenario simulation; São Paulo Metropolitan Region.

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo integrado de gestão da cadeia de suprimentos.....	30
Figura 2 - Modelo de cadeia de abastecimento com logística reversa.....	32
Figura 3 - Avaliação de atributos de emissão de carbono em empresas de logística	33
Figura 4 - Fluxograma do processo de revisão sistemática da literatura	37
Figura 5 - Esquema representativo das macros atividades do estudo.	52
Figura 6 - Representação das dimensões da sustentabilidade com base no modelo Triple Bottom Line	53
Figura 7 - Estrutura hierárquica de decisão do modelo AHP	66
Figura 8 - Exemplo de smart lockers.....	79
Figura 9 - Ponto de coleta (PUDO - pickup, drop off).....	79
Figura 10 - Esquema hub principal e mini-hubs como proposta de centro de consolidação urbana (CCUs).	81
Figura 11 - Distribuição da frequência simulada do Índice Relativo de Sustentabilidade (S) para o baseline e os cenários 1 a 4.....	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Grupo de especialistas.....	64
Tabela 2 - Pesos dos critérios utilizados no cálculo do Índice Relativo de Sustentabilidade (S)	73
Tabela 3 - Subcritérios do capital econômico.....	74
Tabela 4 - Subcritérios do capital social.....	75
Tabela 5 - Subcritérios do capital ambiental.....	75
Tabela 6 - Indicadores ambiental, social e econômico dos quatro cenários avaliados	85
Tabela 7 - Estatísticas descritivas do Índice Relativo de Sustentabilidade (S) dos cenários simulados.....	87
Tabela 8 - Resultados do Índice Relativo de Sustentabilidade (S) dos Cenários sob Diferentes Perfis de Ponderação.....	91

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Pontos positivos e negativos de políticas públicas associadas a logística de last mile	47
Quadro 2 - Indicadores mais recorrentes na literatura sobre LUM.....	55
Quadro 3 - Principais desafios da logística de última milha identificados na literatura e seus focos analíticos	60

LISTA DE ABREVIATURAS

ABCCOMM	Associação Brasileira de Comércio Eletrônico
ADP	Automated Delivery Parcel (Armário Automatizado de Entrega)
AHP	Analytic Hierarchy Process
B2B	Business-to-Business
B2C	Business-to-Consumer
C2B	Consumer-to-Business
C2C	Consumer-to-Consumer
CCUs	Centro de Consolidação Urbana
CDP	Collection and Delivery Point (Ponto de Coleta e Entrega)
CO ₂	Dióxido de Carbono
GCS	Gestão da Cadeia de Suprimentos
GEE	Gases de Efeito Estufa
IA	Inteligência Artificial
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
IoT	Internet of Things (Internet das Coisas)
KPI	Key Performance Indicator (Indicador-Chave de Desempenho)
LEZ	Low Emission Zone (Zona de Baixa Emissão)
LML	Last Mile Logistics
LUM	Logística de Última Milha
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development

PIB	Produto Interno Bruto
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
Scopus®	Base de Dados Científica Scopus
SEADE	Sistema Estadual de Análise de Dados
SENATRAN	Secretaria Nacional de Trânsito
TBL	Triple Bottom Line
TPMP	Third-Party Marketplace Platform

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
2. UTILIDADE DA DISSERTAÇÃO	21
3. OBJETIVOS	22
3.1. Objetivo geral	22
3.2. Objetivos específicos	22
4. REVISÃO TEÓRICA	23
4.1. Conceitos, formas e evolução do comércio eletrônico (e-commerce)	23
4.2. Logística: conceitos e definições	28
4.3 Logística de última milha: conceitos e definições	33
5. REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA	36
5.1. Falhas de entrega	38
5.1.1 Fatores comportamentais e insucesso na primeira tentativa de entrega	39
5.1.2 Riscos de segurança e contextos socioeconômicos	40
5.2. Sustentabilidade na logística de última milha	43
5.3 Métodos de quantificação de emissão CO ₂ utilizados na LUM	48
6. MÉTODO	52
6.1. Definição do modelo conceitual de sustentabilidade	53
6.2. Definição dos indicadores de desempenho	54
6.3. Cálculo dos indicadores de desempenho para cenário 'baseline'	58
6.4. Identificação dos desafios para uma logística mais sustentável	60
6.5. Elaboração dos cenários para uma logística mais sustentável	62
6.6. Definição dos pesos de importância para os capitais social, econômico e ambiental	63
6.7 Cálculo e avaliação comparativa dos indicadores de sustentabilidade dos cenários	68
6.8 Análise de sensibilidade sob diferentes perfis de ponderação	71
7. RESULTADOS E DISCUSSÕES PARCIAIS	73
7.1. Estabelecendo pesos de importância para os capitais econômico, social e ambiental	73
7.2. Identificação dos desafios para uma logística mais sustentável	76
7.3. Estabelecendo cenários de melhorias e seus indicadores KPIs	78
7.4. Indicadores de sustentabilidade	85
7.5 Análise de sensibilidade sob diferentes perfis de ponderação	90

7.6 Comparação dos resultados da pesquisa em comparação ao contexto internacional	93
8.Limitações de Pesquisa	98
9. Conclusões.....	100
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103
APÊNDICE A – Roteiro de Entrevista com Operador Logístico	118
APÊNDICE B – Questionário AHP	119
APÊNDICE C – Código Python para a análise de Monte Carlo sobre o indicador de sustentabilidade	121
APÊNDICE D – Gráficos da Simulação de Monte Carlo dos Cenários e do Baseline	123
APÊNDICE E – Base de dados e resultados da análise de sensibilidade por perfis de pesos.....	126
APÊNDICE F – Resultados da avaliação multicritério das alternativas por critérios e subcritérios do AHP.....	128

1. INTRODUÇÃO

A logística de última milha corresponde à etapa final no processo de entrega de produtos entre empresas e consumidores do comércio eletrônico, abrangendo o percurso desde o local onde o pedido é coletado até o endereço escolhido pelo consumidor final (Lim; Jin; Srai, 2018). O crescimento exponencial desse setor nas últimas décadas transformou profundamente os sistemas logísticos e os padrões de consumo urbano, tornando a Logística de Última Milha (LUM) um dos principais elos estratégicos e críticos da cadeia de suprimentos contemporânea. No Brasil, o setor movimentou cerca de R\$ 187 bilhões em 2023, um crescimento de 24,7% em relação a 2022 (ABCOMM, 2023). Estima-se que 30 % de todas as entregas nacionais concentram-se na Região Metropolitana de São Paulo (IBGE, 2022), contribuindo para o aumento de veículos de carga leves, cuja frota cresceu 35% entre 2020 e 2024 (SENATRAN, 2024).

A consolidação de plataformas digitais e a ampliação da infraestrutura de entrega moldaram novos hábitos de compra, caracterizados pela conveniência, personalização e rapidez. Entretanto, essa expansão, especialmente acentuada após a pandemia de COVID-19, trouxe consigo externalidades urbanas negativas significativas, como o aumento de furtos, intensificação do tráfego, elevação das emissões de gases de efeito estufa (GEE) e maior congestionamento em grandes centros urbanos (Morganti *et al.*, 2014; Rodrigue, 2020). Assim, compreender os impactos socioeconômicos e ambientais associados à logística de última milha torna-se fundamental para o desenvolvimento de sistemas logísticos mais sustentáveis, capazes de equilibrar eficiência operacional e responsabilidade socioambiental em contextos metropolitanos densos (Allen *et al.*, 2018;).

A logística de última milha é considerada um conceito emergente de operação logística, cujo interesse entre acadêmicos e profissionais tem crescido significativamente. A linha do tempo revisada indica que o tema começou a ganhar atenção acadêmica no início deste milênio, com o artigo mais antigo em 2001 e poucas publicações anuais até 2012, Olsson, Hellström e Pålsson (2019) depois disso o volume cresce de forma acentuada. Esse crescimento contínuo decorre do aumento populacional, da urbanização acelerada e do processo de globalização do comércio (Mohammad *et al.*, 2023). O avanço dos negócios em plataformas digitais impulsionou

uma demanda de transporte e entrega de produtos em volume e frequência sem precedentes (Zhu et al., 2023); Villa; Monzón, 2021). O processo de distribuição de última milha gera impactos que extrapolam a satisfação das necessidades individuais, produzindo externalidades sociais relacionadas ao congestionamento urbano, poluição atmosférica e sonora, além de acidentes e conflitos no uso do espaço urbano (Silva; Amaral; Fontes, 2023).

De modo convergente, Shibao e Santos (2021) observam que o transporte urbano tem provocado problemas nas cidades mais urbanizadas, sobretudo no transporte de cargas, exigindo soluções que reduzam custos externos, como congestionamentos e poluição, fenômenos agravados pela expansão do comércio eletrônico (Ranieri et al., 2018). Em média, o transporte urbano de cargas representa 25% do tráfego urbano e 40% das emissões de CO₂ associadas ao transporte (OECD, 2022). Assim, a distribuição de bens na última milha é reconhecida como um dos principais desafios urbanos contemporâneos (Roumboutsos; Kapros; Vanellander, 2014), portanto, torna-se importante aprimorar as condições de trânsito e as operações de carga e descarga em áreas urbanas, buscando maior sustentabilidade

A relevância do tema decorre do fato de que a última milha representa a etapa mais dispendiosa, complexa e ambientalmente sensível de toda a cadeia logística, podendo responder por até 53 % do custo total de transporte (Capgemini Research Institute, 2020) e uma fração expressiva das emissões urbanas de CO₂ (Zennaro et al., 2022). Em metrópoles como São Paulo, por exemplo o tempo médio de congestionamento diário ultrapassa cinco horas, resultando em perdas econômicas estimadas em R\$ 60 bilhões por ano (SENATRAN, 2024; IPEA, 2023). A alta densidade populacional, a limitação de áreas de carga e descarga e a pressão por entregas rápidas agravam a ineficiência operacional do setor. A busca por soluções inovadoras como veículos elétricos, bicicletas de carga, *smartlockers* urbanos e centros de microdistribuição refletem tentativas de mitigar tais impactos sem comprometer o nível de serviço ao consumidor. Sob essa perspectiva, a LUM surge não apenas como um desafio técnico, mas como um campo de análise interdisciplinar, no qual aspectos econômicos, ambientais e sociais interagem de forma complexa e demandam abordagens de avaliação multicritério para orientar políticas públicas e decisões empresariais (Bosona, 2020).

Alguns estudos vêm contribuindo para o avanço do conhecimento nesse campo. Estudos como os de Ranieri et al. (2018), Bosona (2020) e Zennaro *et al.* (2022) discutem a necessidade de integrar sustentabilidade e eficiência na distribuição urbana, propondo modelos de otimização baseados em tecnologias mais limpas e planejamento colaborativo. Estudos recentes voltados ao e-commerce, como os de Cai (2024) e Mucowska (2021), evidenciam que a intensificação das operações de última milha tem ampliado os impactos ambientais e desafios operacionais nos centros urbanos. Nesse contexto, autores como Chandramouli (2023) destacam o papel das tecnologias digitais, especialmente aquelas baseadas em análise preditiva e otimização de rotas, como ferramentas essenciais para aumento da eficiência logística e mitigação de impactos ambientais. Adicionalmente, Cano *et al.* (2022) e Patella *et al.* (2020) discutem a adoção de soluções potencialmente mais sustentáveis, como veículos elétricos, pontos de coleta e modelos logísticos colaborativos, enquanto Andrei *et al.* (2024) enfatizam o potencial de sistemas autônomos e da integração logística para promover maior eficiência e sustentabilidade nas cadeias de distribuição do e-commerce.

No contexto nacional, estudos recentes evidenciam que a distribuição urbana de cargas em grandes centros brasileiros enfrenta desafios relacionados ao congestionamento, às externalidades ambientais e à necessidade de maior integração entre políticas públicas e infraestrutura logística. Nesse sentido, Shibao e Santos (2021) destacam a importância da adoção de veículos mais sustentáveis e da transição para fontes energéticas alternativas ao combustível fóssil na logística de última milha, enquanto Hirschhorn et al. (2020) ressaltam o papel da coordenação institucional, da integração modal e das políticas públicas na promoção de sistemas urbanos de mobilidade mais sustentáveis. Apesar desses avanços, observa-se que muitas dessas abordagens ainda se configuram como tentativas iniciais e, por vezes, superficiais frente à complexidade dos desafios associados à sustentabilidade na última milha.

De acordo com a revisão de literatura realizado, pôde-se observar abordagens quantitativas aplicadas ao contexto metropolitano brasileiro que integrem as três dimensões da sustentabilidade econômica, ambiental e social em um mesmo modelo analítico. Apesar dos avanços conceituais e tecnológicos, permanecem dúvidas e desafios quanto à mensuração equilibrada desses três pilares, uma vez que, conforme

apontam Silva, Amaral e Fontes (2023), não há consenso sobre modelos capazes de integrar plenamente na logística de última milha. Estudos anteriores concentram-se predominantemente em indicadores econômicos e ambientais, priorizando eficiência operacional, custos e emissões, enquanto aspectos sociais, como segurança, equidade e impactos sobre a população urbana, permanecem subexplorados, conforme evidenciado por McDonald (2022). Ademais, Maravić, Pajić e Andrejić (2025) e Bosona (2020) destacam as dificuldades na identificação e mensuração de indicadores sociais, evidenciando lacunas na incorporação dessa dimensão nos modelos analíticos existentes. Nesse sentido, aspectos relacionados à aceitação social, aos impactos sobre diferentes grupos e à inclusão de stakeholders ainda são tratados de forma incipiente, conforme discutido por Rismanto (2024) e Maravić, Pajić e Andrejić (2025), reforçando a necessidade de abordagens mais abrangentes e integradas. Tais lacunas evidenciam a necessidade de novos modelos de avaliação que integrem múltiplos critérios e reduzam as incertezas associadas à tomada de decisão na Logística de Última Milha (LUM), especialmente em ambientes urbanos de alta complexidade (Ranieri *et al.*, 2018).

O objetivo geral deste estudo é avaliar a sustentabilidade de diferentes cenários logísticos de última milha aplicados à Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), considerando simultaneamente os capitais econômico, ambiental e social. A contribuição teórica deste estudo reside na integração entre abordagens qualitativas e quantitativas aplicadas ao contexto urbano brasileiro, propondo um referencial metodológico que possa orientar tanto a pesquisa acadêmica quanto a formulação de estratégias empresariais e políticas públicas voltadas à sustentabilidade na Logística de Última Milha.

O presente estudo delimita-se à Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), escolhida por representar um dos contextos mais desafiadores e dinâmicos do país no que tange à distribuição urbana de mercadorias. A RMSP abriga 21,6 milhões de habitantes, cerca de 9,4 milhões de veículos sendo 1,2 milhão comerciais leves e responde por aproximadamente 30 % do PIB brasileiro (IBGE, 2022; DETRAN-SP, 2024; SEADE, 2024). Estima-se que circulem mais de 2,5 milhões de entregas de e-commerce por dia na região (ABCOMM, 2023), o que reforça sua relevância como recorte empírico para estudos de sustentabilidade na logística.

2. UTILIDADE DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho contribui para o avanço do conhecimento sobre sustentabilidade em sistemas logísticos urbanos, com ênfase na logística de última milha, reconhecida como a etapa mais complexa, custosa e ambientalmente sensível das cadeias de suprimentos contemporâneas. A pesquisa propõe uma abordagem quantitativa que integra o conceito do Triple Bottom Line com técnicas multicritério (AHP) e simulação estocástica (Monte Carlo), permitindo avaliar de forma estruturada e robusta os *trade-offs* entre os pilares econômico, ambiental e social. O estudo avança ao reduzir lacunas existentes na literatura relacionadas à mensuração integrada da sustentabilidade na logística de última milha, especialmente ao incorporar a dimensão social, frequentemente negligenciada em modelos tradicionais. De forma teórica, o estudo contribui fornecendo uma abordagem quantitativa para se avaliar o desempenho sobre a sustentabilidade da logística de última milha, e de forma prática aplicando na Região Metropolitana de São Paulo, um caso real de alta densidade logística e representativo dos problemas enfrentados na logística de última milha em centros urbanos. A aplicação do modelo no contexto amplia a relevância empírica da pesquisa, oferecendo evidências aplicadas em um dos ambientes logísticos mais desafiadores do país, contribuindo para o desenvolvimento de soluções alinhadas às necessidades de grandes centros urbanos.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo geral

Propor uma abordagem quantitativa e aplicá-la na avaliação da sustentabilidade de cenários para soluções logísticas de última milha no e-commerce.

3.2. Objetivos específicos

- a) Identificar os atuais desafios práticos da logística de última no e-commerce, e utilizá-los para elaborar cenários que possam superar esses desafios.
- b) Identificar os pesos de importância aos capitais ambientais, sociais e econômicos, como praticamente considerados por especialistas em logística de última milha no e-commerce.
- c) Aplicar a abordagem proposta no caso da logística de última milha do e-commerce na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP).

4. REVISÃO TEÓRICA

A revisão apresenta os conceitos principais que auxiliam no entendimento do estudo.

4.1. Conceitos, formas e evolução do comercio eletrônico (e-commerce)

O comércio eletrônico, frequentemente abreviado para e-commerce, representa a compra e venda de bens ou serviços através da internet (Bhumika *et al.*, 2022). Este conceito abrange uma vasta gama de dados, sistemas e ferramentas que facilitam as transações online tanto para compradores como para vendedores, incluindo, compras através de dispositivos móveis e a encriptação de pagamentos online (Shettar, 2023). A maioria das empresas com presença online utiliza uma loja virtual e plataformas para conduzir as suas atividades de marketing e vendas, bem como para gerir a logística e o cumprimento de pedidos no âmbito do comércio eletrônico

A definição de comércio eletrônico tem sido abordada por diversas organizações internacionais, teóricos e autores, resultando em várias perspectivas, mas uma característica comum é a sua ligação com o uso da tecnologia da informação (Kedah, 2023). Alguns autores definem o e-commerce como o processo de compra, venda, transferência ou troca de produtos, serviços ou informações através de redes informáticas via internet, outros enfatizam que é uma forma especial de transações, onde a sua conclusão ocorre eletronicamente (Pradana, 2015).

Fransoo *et al.* (2014) descreveram o comércio eletrônico como a utilização de tecnologia para comunicar ou transacionar com partes interessadas. Mais recentemente, Singh em (2004), identificou que as empresas tradicionais estavam adotando o e-business como uma nova forma de fazer negócios, com o B2B (Business-to-Business) a ser o modelo predominante. No entanto, o comércio eletrônico moderno é mais complexo, incorporando várias plataformas e impactando todos os aspetos das operações comerciais (Jabar; Ogunsola, 2022).

A natureza do comércio eletrônico é multifacetada e integra vários componentes essenciais. A sua base tecnológica permite a transmissão de fundos e dados online, o que é fundamental para a conclusão das vendas (Gohil; Pathare; Palve, 2022). Isto implica a utilização de redes informáticas e a dependência de tecnologias de informação e comunicação digital (Mozgova *et al.*, 2022).

No contexto atual, o comércio eletrônico é um pilar da economia digital, que tem a capacidade de quebrar as barreiras de tempo e espaço do comércio tradicional, diminuindo as lacunas entre a produção, distribuição e consumo (Turchyn; Kunešová, 2022). Aumenta a eficiência da gestão do fluxo de materiais, do fluxo de caixa e do fluxo de informação, desempenhando um papel cada vez mais importante na expansão do espaço de negócios, na redução de custos, no aumento da eficiência e na promoção do desenvolvimento económico (Li, 2025). A globalização e a integração económica mundial impulsionaram o comércio eletrônico sendo fundamental para o comércio internacional (Ahi; Sinkovics; Sinkovics, 2023)

A pesquisa sobre o comércio eletrônico abrange várias dimensões representa, incluindo o comportamento do consumidor, a estrutura do e-commerce, a distribuição de produtos e a sustentabilidade ambiental (Veiga *et al.*, 2024). O comportamento do consumidor envolve o estudo de como os indivíduos interagem com as plataformas de comércio eletrônico, considerando as decisões de compra, a experiência do consumidor, a confiança e a lealdade à marca. Segundo Veiga *et al.* (2024), a estrutura do e-commerce diz respeito aos aspectos técnicos e estratégicos que sustentam as operações digitais, incluindo infraestrutura, tecnologias empregadas, segurança de dados, usabilidade dos websites e a implementação de Inteligência

Artificial (IA) e Big Data. Já a distribuição de produtos compreende os processos logísticos associados ao comércio eletrônico, como a gestão de inventário, os canais de distribuição, o tempo de entrega e as práticas de logística reversa. Por fim, a sustentabilidade ambiental enfatiza práticas responsáveis, tais como o uso de embalagens ecológicas, a busca por eficiência energética e a gestão adequada de resíduos.

Essas quatro dimensões demonstram a complexidade e abrangência do conceito de comércio eletrônico na era digital, revelando que sua efetividade depende da integração equilibrada entre fatores tecnológicos, logísticos, comportamentais e ambientais. Em resumo, o comércio eletrônico é um conceito dinâmico e abrangente que vai além da simples transação online, envolve a integração de tecnologia, marketing, logística, comportamento do consumidor e modelos de negócio para criar um ecossistema comercial complexo e em constante evolução.

A evolução do comércio eletrônico (e-commerce) ao longo do tempo reflete uma progressão significativa impulsionada por avanços tecnológicos e mudanças nas

dinâmicas de mercado, transformando a maneira como bens e serviços são transacionados globalmente (Shettar, 2023). Inicialmente, as raízes do e-commerce podem ser traçadas até a década de 1990, quando a popularização da internet começou a permitir a compra e venda de produtos e serviços online, este período marcou o início da utilização da tecnologia, como a internet, para facilitar a comunicação e as transações entre as partes interessadas, como os clientes (Ntumba; Aguayo; Maina, 2023).

Nos primeiros anos, o foco era frequentemente na transação simples e na transferência eletrônica de fundos. O conceito de e-business, que é mais amplo do que o e-commerce, surgiu para abranger todas as formas de uso de tecnologias de informação e comunicação digitais para apoiar ou aumentar a eficiência dos processos de venda, desde a fase de preparação até às negociações e implementação (Mozgova *et al.*, 2022). O e-commerce, nesse contexto, era visto como uma das áreas do e-business, concentrando-se especificamente nas transações de compra e venda online.

No início do século XXI, a paisagem do e-commerce começou a expandir-se, em 2004, observou-se que as empresas tradicionais estavam a adotar o e-business como uma nova forma de fazer negócios, com o modelo Business-to-Business (B2B) a ser predominante (Ozansoy Çadırcı; Sağkaya Güngör, 2021). A "bolha da internet" no final da década de 1990 e início dos anos 2000, embora tenha levado a algumas falhas, também pavimentou o caminho para o desenvolvimento de modelos de negócio mais sustentáveis e a integração mais profunda do e-commerce nas operações empresariais (Lee; Chen; Fan, 2006).

Com o passar do tempo, o e-commerce tornou-se mais complexo, incorporando uma variedade de plataformas e impactando todos os aspetos das operações comerciais (Shettar, 2023). A crescente penetração da internet e dos dispositivos móveis transformou a acessibilidade do e-commerce, permitindo que um número cada vez maior de pessoas em áreas urbanas e além delas utilizem a internet para fins comerciais (Pradana, 2015). Em suma, o e-commerce evoluiu de transações online básicas para um ecossistema complexo e dinâmico, impulsionado pela inovação tecnológica, pela digitalização das empresas e pela crescente interconexão global, essa evolução não só redefiniu o comércio, mas também criou novas oportunidades e desafios para empresas e consumidores.

Os principais tipos de e-commerce, podem ser categorizados de diversas formas, refletindo a complexidade e a abrangência deste ecossistema digital, uma das classificações fundamentais baseia-se nas interações entre as entidades envolvidas na transação (Wa, Riyanti e Safari 2024). Tradicionalmente, os modelos de e-commerce são diferenciados pela natureza dos participantes, como empresas, consumidores e até mesmo governos. No entanto, a evolução contínua da tecnologia e das plataformas digitais tem levado ao surgimento de novas modalidades e à redefinição das existentes, entre os tipos mais evidentes, alguns modelos possuem destaque (Mozgova *et al.*, 2022):

- a) **Business-to-Consumer (B2C):** Este é o modelo mais reconhecido de e-commerce, onde empresas vendem produtos ou serviços diretamente aos consumidores finais através da internet (Shettar, 2023). Exemplos incluem lojas online de e-commerce que oferecem uma vasta gama de bens, desde vestuário a eletrônica. A popularidade do B2C é impulsionada pela conveniência, acessibilidade e a capacidade de alcançar um público global (Panchal; Shaikh, 2022).
- b) **Business-to-Business (B2B):** Neste modelo, as transações ocorrem entre duas ou mais empresas, isso pode envolver a venda de matérias-primas, componentes, softwares ou serviços que uma empresa necessita para operar ou produzir os seus próprios bens. Embora menos visível para o consumidor comum, o B2B é um segmento massivo e foi um dos modelos dominantes na adoção inicial do e-business pelas empresas tradicionais (Mozgova *et al.*, 2022).
- c) **Consumer-to-Consumer (C2C):** Facilita a venda de produtos ou serviços diretamente entre consumidores, geralmente através de plataformas de terceiros que atuam como intermediários. Mercados online de leilões e classificados são exemplos clássicos deste modelo, permitindo que indivíduos vendam itens usados ou feitos à mão a outros consumidores.
- d) **Consumer-to-Business (C2B):** Menos comum, mas crescente, este modelo permite que os consumidores ofereçam produtos ou serviços a empresas. Um exemplo seria um freelancer que oferece os seus serviços (design gráfico, escrita, programação) a uma empresa através de plataformas online.

Além destas classificações baseadas nos atores, a evolução do e-commerce tem gerado tendências e tipos específicos de plataformas e abordagens como:

- a) **Comércio Transfronteiriço (Cross-border E-commerce):** Refere-se à compra e venda de produtos e serviços entre um vendedor localizado num país e um comprador em outro país, este tipo de comércio eletrônico é facilitado por plataformas que oferecem serviços logísticos, de pagamento eletrônico, desalfandegamento e marketing, sendo crucial para a globalização e a integração econômica mundial (Zhumadilova; Dussipov; Aitimov, 2020). A capacidade de transformação digital das empresas e as capacidades de serviço das plataformas são fatores que influenciam diretamente o desempenho financeiro neste contexto (Grigoryan, 2023).
- b) **Social Commerce:** Esta modalidade utiliza plataformas de redes sociais para facilitar as vendas, focando-se em interações pessoais e na criação de comunidades em torno de produtos ou marcas. Distingue-se das plataformas de e-commerce tradicionais por muitas vezes apresenta custos iniciais mais baixos e um modelo baseado na conversão de redes sociais dos utilizadores em vendas (Sokolova; Titova, 2024).
- c) **Mobile Commerce (M-commerce):** Embora não seja um tipo distinto de e-commerce em termos de participantes, o m-commerce representa a crescente tendência de realizar transações comerciais através de dispositivos móveis, como smartphones e tablets. A disseminação destes dispositivos e a conveniência que oferecem transformaram significativamente a forma como os consumidores acedem e interagem com as plataformas de e-commerce (Panchal; Shaikh, 2022).
- d) **Plataformas de Terceiros (Third-Party Marketplace Platforms - TPMP):** Estas são plataformas onde múltiplos vendedores podem listar os seus produtos e serviços para uma vasta base de clientes. A confiança nestas plataformas tem mostrado uma relação positiva com o desempenho de internacionalização das empresas no e-commerce transfronteiriço (Sokolova; Titova, 2024).

Portanto, o sucesso no e-commerce depende da integração eficiente de vários fatores, a compreensão do comportamento de compra do cliente, desde as decisões

até a experiência e a confiança; o fortalecimento da base tecnológica (infraestrutura, segurança e o uso de IA e Big Data); a excelência na logística de entrega (gestão de estoque e distribuição); e o compromisso com a sustentabilidade (embalagens e eficiência energética). A verdadeira vantagem competitiva, portanto, reside na forma como esses pilares se convergem, criando uma cadeia de valor coesa. Um consumidor que valoriza práticas verdes, por exemplo, exige que a tecnologia de e-commerce e a logística de entrega ofereçam transparência e baixo impacto ambiental.

Essa sinergia não apenas atende às expectativas éticas, mas também otimiza custos operacionais a longo prazo. Dessa forma, a digitalização, a entrega eficiente e a responsabilidade socioambiental deixam de ser áreas isoladas. Elas se fundem em uma estratégia multicanal robusta, que promove a fidelidade do cliente e impulsiona o crescimento sustentável do negócio. O resultado é um ecossistema de vendas online que é rentável e resiliente, preparado para os desafios do mercado futuro.

4.2. Logística: conceitos e definições

A logística é um campo dinâmico que evoluiu significativamente ao longo do tempo, influenciada por fatores socioeconômicos e tecnológicos. Atualmente, a logística é amplamente compreendida como a arte de gerir a cadeia de abastecimento e a ciência de gerir e controlar o fluxo de bens, informações e outros recursos (como energia e pessoas) desde o ponto de origem até ao ponto de consumo, com o objetivo de satisfazer os requisitos dos clientes.

Uma definição fundamental da logística é que se trata de um sistema eficaz para as empresas entregarem produtos aos clientes no local exato onde são procurados, na hora certa e com o custo adequado (Kanagavalli; Azeez, 2019).

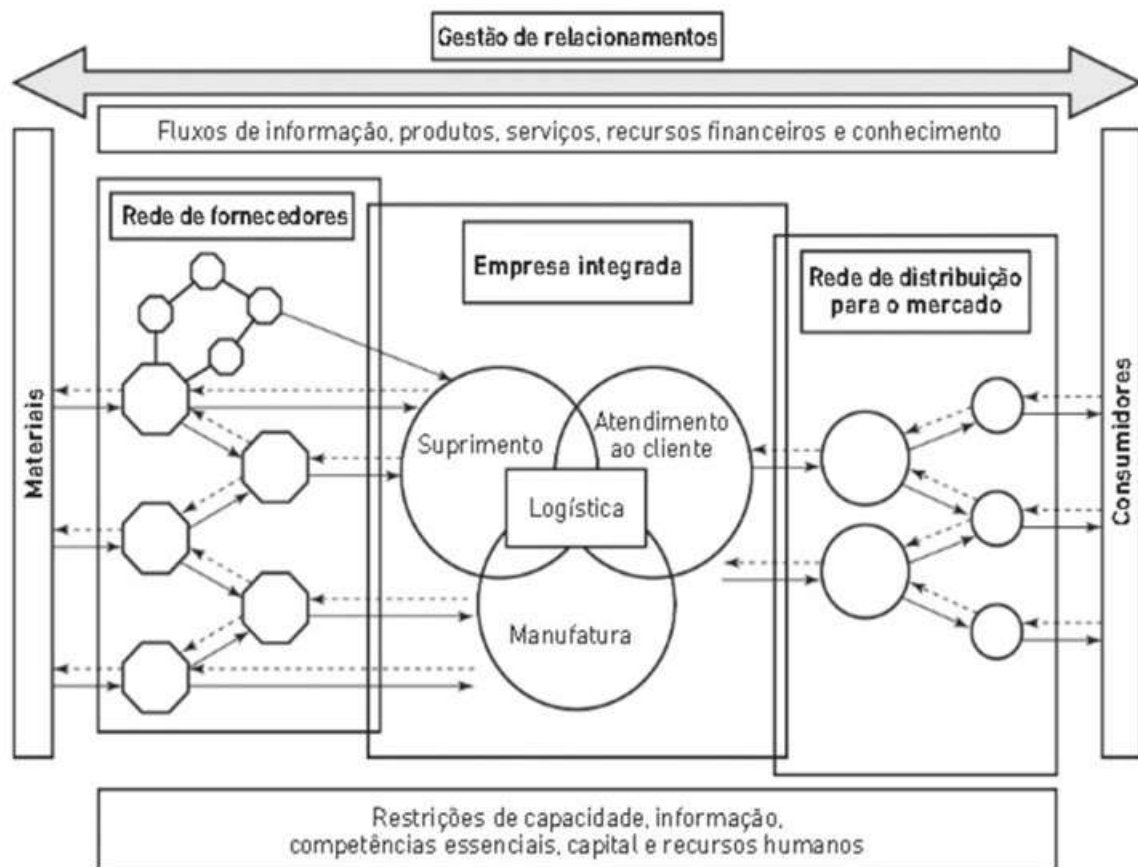
Este processo abrange o planejamento, a implementação e o controle do fluxo de matérias-primas e produtos acabados, desde os fornecedores até aos clientes (Kanagavalli; Azeez, 2019). A logística envolve, portanto, um conjunto de atividades cruciais que asseguram a sincronização dos fluxos de materiais através da coordenação de processos e da utilização de recursos dentro da empresa e na cadeia de abastecimento. O objetivo primordial é garantir a disponibilidade de bens no local e na hora esperados pelo cliente (Dadzie; Richard, 2025).

A evolução do conceito de logística é complexa e tem sido objeto de diversas análises críticas, inicialmente, o foco estava principalmente nas funções de transporte e mobilidade (Yergobek; Ydyris, 2020; Kumarage, 2021). No entanto, o seu entendimento expandiu-se consideravelmente para abranger uma gama mais vasta de atividades dentro da cadeia de abastecimento, designada por "Logística Empresarial", investigadores e profissionais estudam os vários processos dentro das cadeias de abastecimento individualmente, mas também analisam o conceito da cadeia de abastecimento como um todo, incluindo o seu desempenho e design (Frazzon *et al.*, 2019; Kumarage, 2021)

A integração da logística na gestão moderna das organizações passou a representar um fator estratégico essencial, influenciando diretamente a competitividade e a eficiência operacional das empresas. Essa integração exige a coordenação entre suprimentos, manufatura, distribuição e atendimento ao cliente, formando um sistema coeso e dinâmico de fluxos materiais e informacionais. Nesse contexto, destaca-se a importância do modelo integrado de gestão da cadeia de suprimentos, ilustrado na Figura 1, o qual demonstra interconexão entre fornecedores, empresa e mercado consumidor, mediada pela logística como elemento central (Ahmed *et al.* 2023). Esse modelo, mostra que o sucesso da cadeia depende da gestão eficaz dos relacionamentos e da sincronização dos fluxos de informação, produtos e recursos.

Além do papel operacional, a logística passa a assumir função estratégica ao contribuir para a redução de custos, melhoria do nível de serviço e aumento da capacidade de resposta às demandas do mercado. A crescente complexidade das cadeias de suprimentos também intensifica a necessidade de integração entre agentes, tecnologias e processos, exigindo maior visibilidade das operações e compartilhamento de informações (Baah *et al.* 2022). Nesse cenário, decisões relacionadas ao transporte, armazenagem e distribuição deixam de ser isoladas e passam a influenciar diretamente o desempenho global da cadeia, tornando a coordenação logística um fator determinante para a geração de vantagem competitiva sustentável (Esmizadeh; Parast 2021).

Figura 1 - Modelo integrado de gestão da cadeia de suprimentos.



Fonte: Bowersox; Closs; Cooper (2007)

A logística pode ser vista como uma parte integrante dos processos da cadeia de suprimentos, planejando e controlando a rentabilidade dos fluxos e armazenamento de bens, serviços e informações (Frazzon *et al.*, 2019). A sua importância estratégica é sublinhada pela necessidade de garantir a segurança econômica e aumentar a eficiência operacional das empresas. Uma entrega pontual e eficiente de bens e serviços ajuda a manter as operações comerciais sem interrupções, e a construção de cadeias de abastecimento ótimas reduz custos e melhora a gestão de inventário (Baybik; Shvandar, 2024).

Embora os termos "logística" e "gestão da cadeia de suprimentos" (GCS) sejam por vezes usados de forma intercambiável, existem diferenças e aspetos comuns. A logística é um termo mais antigo, enquanto a gestão da cadeia de abastecimento refere-se a vários processos interligados (Nagy-Bota; Moldovan, 2022). A logística é uma atividade dentro da gestão da cadeia de suprimentos, sendo esta última um

conceito mais abrangente que se centra na integração e coordenação de atividades e processos dentro e entre organizações na cadeia de abastecimento. A GCS visa a otimização de toda a rede de recursos, instalações, clientes, produtos e métodos de controlo de inventário, compras e distribuição (Lati; Aghajani; Lotfi, 2022; Nagy-Bota; Moldovan, 2022).

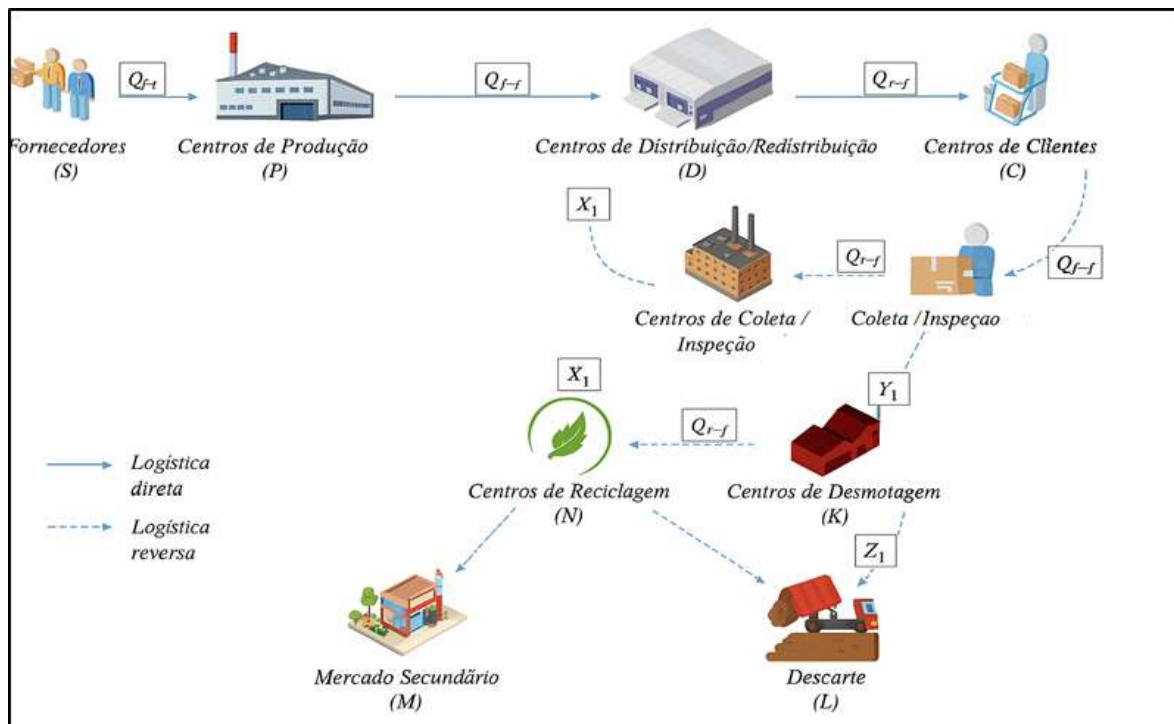
No contexto atual, a logística tem sido profundamente afetada por avanços tecnológicos. A “Logística 4.0” ou “Logística Inteligente” lida com os vários aspetos da gestão da cadeia de abastecimento de ponta a ponta, integrando tecnologias como a Internet das Coisas (IoT), a análise de big data e a automação para otimizar as operações logísticas (Tiwari, 2023). Essas tecnologias contribuem para a digitalização de procedimentos em áreas como fabricação, varejo, armazenagem e transporte.

Além disso, a logística de transporte, que é um subdomínio da logística, está a ser redefinida, evoluindo de uma função de mobilidade para uma demanda integrada pela posse de bens com valor agregado, sem atrasos, confiável e com custo-eficiência (Kumarage, 2021). Por exemplo, no planeamento de redes de transporte público, são consideradas redes bimodais que integram modos de transporte pedestre e de carro para otimizar o design da rede de carros e a localização das paradas. A otimização de rotas para veículos elétricos, que inclui paradas de carregamento e modelos de carregamento realistas, é outro exemplo da complexidade e da importância da logística de transporte moderna (Baum *et al*, 2019).

A logística reversa, que envolve a gestão de produtos que retornam do cliente ao fabricante ou a outros pontos da cadeia de abastecimento, também é um componente crítico, especialmente para o descarte adequado e o processamento de resíduos eletrônicos, que contêm substâncias valiosas e perigosas, este tipo de logística desempenha um papel fundamental na economia circular e na sustentabilidade ambiental (Haq *et al.*, 2023).

A Figura 2 mostra uma rede de cadeia de abastecimento abrangente que integra processos de logística direta e reversa, evidenciando a importância da gestão mais sustentável da cadeia de abastecimento através da reciclagem, recuperação e descarte de produtos.

Figura 2 - Modelo de cadeia de abastecimento com logística reversa.



Fonte: Moslehi; Sahebi; Teymouri, (2020)

A integração entre os processos de logística direta e reversa reflete a busca por cadeias de abastecimento mais sustentáveis e circulares, nas quais o fluxo de materiais não se encerra no consumo, mas retorna ao sistema produtivo por meio da recuperação, reciclagem e descarte adequado (Costa *et al.*, 2025). Essa abordagem amplia o escopo tradicional da logística ao incorporar práticas de economia circular e responsabilidade ambiental. Nesse contexto, a mensuração e gestão das emissões de carbono tornam-se instrumentos essenciais para avaliar o desempenho ambiental das operações logísticas (Ullah *et al.*, 2023).

A avaliação de atributos de emissão de carbono em empresas de logística, conforme ilustrado na Figura 3, destaca o foco crescente na sustentabilidade, evidenciando como a capacidade operacional, as instalações e equipamentos e os sistemas de gestão influenciam diretamente a pegada de carbono. Essa correlação mostra que a eficiência logística e a mitigação de emissões são dimensões complementares na construção de uma gestão integrada e sustentável da cadeia de abastecimento, alinhada aos princípios da logística verde e da economia de baixo carbono (Liu *et al.*, 2024).

Figura 3 - Avaliação de atributos de emissão de carbono em empresas de logística



Fonte: Liu et al (2024)

A logística é um conceito multifacetado e em constante evolução, que vai além do simples transporte, englobando uma gestão integrada de fluxos de materiais, informações e recursos para otimizar a satisfação do cliente e a eficiência operacional, com um enfoque crescente na sustentabilidade e na adoção de tecnologias mais avançadas (Arhipov; Lyashenko, 2022).

4.3 Logística de última milha: conceitos e definições

A gestão da cadeia de suprimentos (GCS) constitui um conceito mais amplo, responsável pela integração de processos, agentes e fluxos ao longo da cadeia, enquanto a logística atua como um de seus componentes operacionais, com foco na gestão dos fluxos físicos e na execução das atividades de transporte, armazenagem e manuseio de recursos (Nagy-Bota; Moldovan, 2022).

A logística pode ser classificada em diversas áreas, incluindo logística de abastecimento, logística de produção, logística de distribuição e, em particular, a logística de última milha (Cai, 2024). Nesse contexto, a logística pode ser compreendida como uma disciplina em constante evolução, cuja relevância no

ambiente empresarial está diretamente associada à melhoria da eficiência operacional e à competitividade organizacional.

As tarefas logísticas podem ser analisadas por meio de diferentes métodos matemáticos, incluindo problemas de otimização combinatória, como o problema do caixeiro viajante, o problema de alocação de recursos, o problema de transporte e o problema de fluxo máximo (Shestakov; Zuenko, 2022). Dessa forma, a otimização na gestão da cadeia de suprimentos busca melhorar o desempenho por meio da redução de custos, aumento da eficiência e aprimoramento do nível de serviço ao cliente

A logística de última milha é a fase final e essencial no processo de entrega de um produto, desde um centro de distribuição ou armazém até o destino final, geralmente a porta do consumidor (Liu; Hassini, 2023). Este segmento da cadeia de suprimentos é notório pelos seus desafios operacionais e custos elevados, tornando-se um ponto crítico de concorrência devido à crescente demanda do comércio eletrônico e às expectativas dos clientes por entregas rápidas e personalizadas (Modi, 2025).

Caracterizada por ser o elo mais custoso e complexo na cadeia de suprimentos, chegando a representar 45% do tempo total de entrega de uma encomenda e uma parte significativa dos custos logísticos (Modi, 2025). Os principais desafios identificados na literatura incluem:

Custos Logísticos Elevados: A LUM é frequentemente a parte mais cara da cadeia de suprimentos devido a fatores como baixas densidades de entrega, rotas ineficientes, congestionamento de tráfego e falhas na primeira tentativa de entrega (El Moussaoui *et al.*, 2022).

Complexidade e Gestão da LUM: Envolve a coordenação de múltiplos intervenientes, a gestão de expectativas dos clientes e a adaptação a condições urbanas em constante mudança. A fragmentação e a complexidade do setor são acentuadas pela diversidade de metodologias e disciplinas envolvidas (Olsson; Hellström; Pålsson, 2019).

Falhas na Entrega a ausência do cliente: No local de entrega é uma causa comum de falhas na primeira tentativa, resultando em retrabalho e custos adicionais para as transportadoras. A otimização para equilibrar a eficiência de custos e a sustentabilidade ambiental é um objetivo contínuo (Balaska *et al.*, 2022). Infraestrutura inadequada, em algumas regiões, como na África do Sul, representam um desafio

significativo para a eficiência e sustentabilidade da última milha (Alidaee; Wang; Sua, 2023):

Desafios Operacionais e Ambientais: O aumento das entregas de última milha, impulsionado pela urbanização e pelo crescimento do varejo multicanais, intensifica o congestionamento do tráfego, a poluição do ar, o ruído e as emissões de carbono, especialmente em centros urbanos. A busca por alternativas mais sustentáveis tem se tornado uma prioridade, com o foco na redução do impacto ambiental (Bonilla; Bouzon; Montoya, 2024).

Complexidade e Gestão: A gestão da LUM é complexa devido à necessidade de coordenar múltiplos intervenientes, gerir as expectativas dos clientes por entregas rápidas e adaptadas, e lidar com as condições urbanas em constante mudança. A rápida expansão do número de publicações acadêmicas sobre o tema, sublinha a complexidade e a fragmentação do campo de estudo (Olsson; Hellström; Pålsson, 2019).

Expectativas do Consumidor: Os clientes esperam respostas rápidas às suas expectativas, o que exige flexibilidade tanto na eficiência da entrega quanto na velocidade de adaptação a novas condições. Além disso, a expectativa de baixos custos de entrega por parte do cliente é um fator determinante na escolha do fornecedor (Yatsina; Zhuchenko; Moskvichenko, 2023).

Inovações Tecnológicas: O futuro da logística de última milha será moldado por tecnologias emergentes como veículos autônomos, drones, robôs, inteligência artificial (IA) e blockchain. A IA, por exemplo, tem sido objeto de crescente atenção na gestão da produção, operações e logística.

Disrupções na Cadeia de Suprimentos: Eventos como a pandemia de COVID-19 demonstraram a vulnerabilidade da logística de última milha e a necessidade de soluções inovadoras, como o conceito de "armazém móvel", para superar limitações das práticas existentes (Srinivas; Marathe, 2021). A relevância da logística nas operações e na gestão da cadeia de suprimentos reside na sua capacidade de impactar diretamente a satisfação do cliente, os custos operacionais e a sustentabilidade de forma mais ampla. A otimização logística, especialmente na última milha, é crucial para a competitividade das empresas em um cenário de mercado cada vez mais dinâmico e focado no consumidor (Pourmohammadreza, Jokar e Van Woensel, 2025).

5. REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

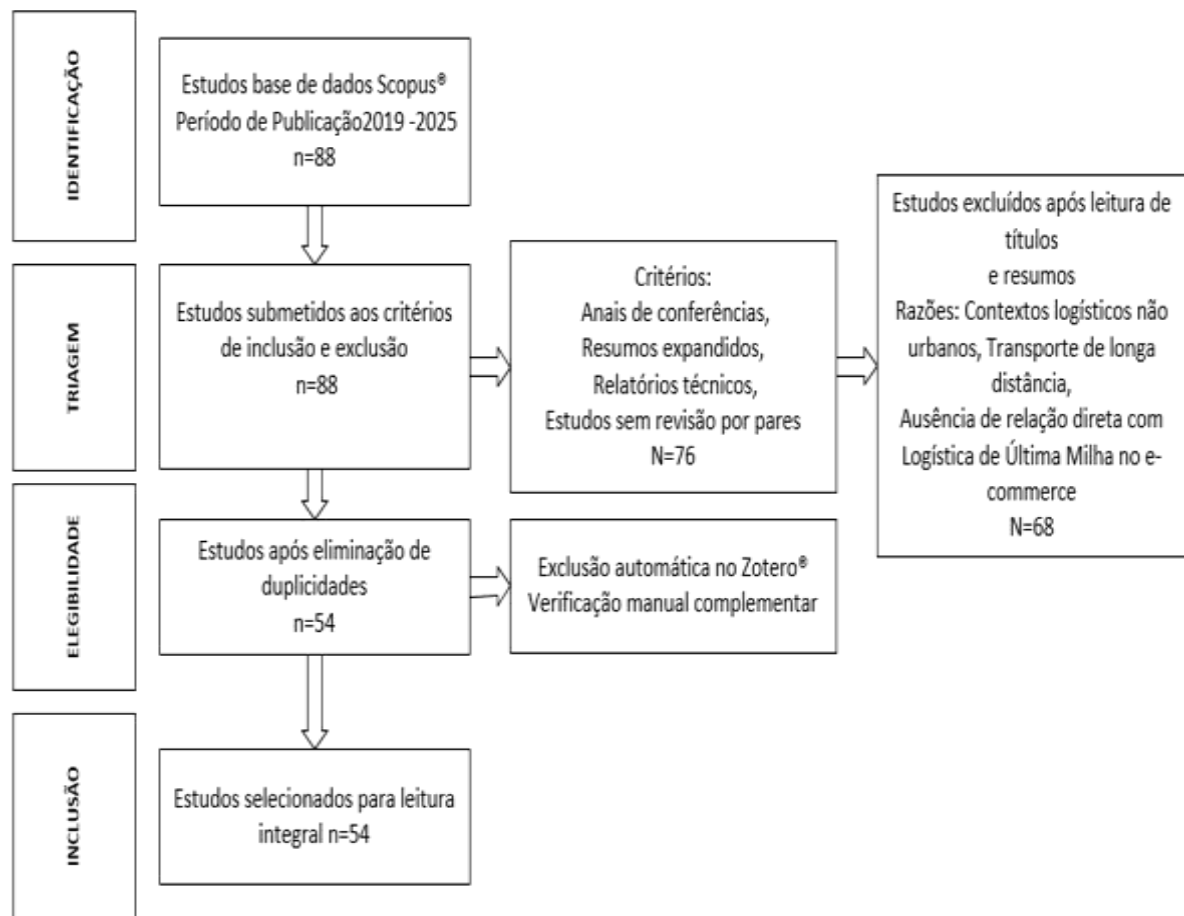
Para este estudo, cujo objetivo é propor uma abordagem e avaliar a sustentabilidade de cenários de Logística de Última Milha (LUM) na RMSP, o levantamento de dados e informações foi estruturado e foram obtidos por meio de uma revisão sistemática da literatura científica, conduzida com busca de publicações nas bases Scopus®. Essa revisão teve como finalidade identificar os principais desafios operacionais, econômicos, ambientais e sociais da LUM e selecionar os estudos mais relevantes.

Para a execução desta revisão, foram elaboradas expressões booleanas conforme apresentado a seguir:

- "last mile delivery" AND e-commerce AND "delivery failure"
- "failed delivery" AND "home delivery" AND e-commerce
- "last mile logistics" AND e-commerce AND "traffic congestion"
- "urban logistics" AND "e-commerce" AND routing
- ("last mile delivery" OR "final mile" OR "urban logistics") AND ("e-commerce" OR "online retail" OR "digital commerce") AND ("vehicle restriction" OR "traffic restriction" OR "access regulation" OR "low emission zone" OR "congestion charge")
- ("urban logistics" OR "city logistics" OR "urban freight transport") AND ("time windows" OR "delivery slots" OR "delivery time restrictions") AND ("restricted zones" OR "low emission zones" OR "traffic restrictions")
- "last mile delivery" AND e-commerce AND "cargo theft"
- "supply chain security" AND e-commerce AND "last mile"

Os principais descritores relacionados à LUM e ao comércio eletrônico (e-commerce), abrangendo, ainda, variáveis associadas aos desafios operacionais, ambientais e sociais foram identificadas na literatura recente, seguindo as etapas metodológicas detalhadas na Figura 4. A busca inicial retornou 88 registros publicados no período compreendido entre 2019 e 2025. O recorte temporal entre 2019 e 2025 foi adotado por contemplar o período imediatamente anterior, durante e posterior à pandemia de COVID-19, permitindo capturar as transformações estruturais nas operações logísticas decorrentes da intensificação do comércio eletrônico. A escolha desse intervalo de tempo justifica-se, ademais, pela necessidade de captar as mudanças estruturais ocorridas nas operações de transporte urbano de mercadorias, contemplando estudos que reflitam o novo cenário de integração tecnológica, digitalização logística e as tendências mais recentes de inovação, eficiência energética e políticas de sustentabilidade urbana.

Figura 4 - Fluxograma do processo de revisão sistemática da literatura



Fonte: autor (2026)

Após a etapa inicial de busca, aplicaram-se filtros de inclusão e exclusão com o objetivo de refinar o conjunto de artigos e assegurar a qualidade científica do material analisado. Mantiveram-se apenas os artigos originais e artigos de revisão publicados em periódicos revisados por pares, resultando em 76 publicações elegíveis. Foram excluídos anais de conferências, resumos expandidos, dissertações, teses e relatórios técnicos, por não atenderem aos critérios formais de revisão. Essa filtragem inicial permitiu concentrar a análise em estudos de natureza acadêmica consolidada, com metodologia explicitada e resultados verificáveis.

Dos 76 registros elegíveis, 68 permaneceram após a etapa de eliminação de duplicações. A remoção foi realizada em duas fases: primeiramente, de forma automatizada no software Zotero®, e, posteriormente, por verificação manual, garantindo precisão na exclusão de artigos indexados simultaneamente em diferentes bases vinculadas à Scopus®. Esta etapa se revelou essencial para evitar distorções

quantitativas na análise e assegurar que cada estudo contribuísse de forma única para a construção da base teórica da pesquisa.

A seleção dos artigos restantes foi conduzida por meio da leitura dos títulos e resumos, verificando a aderência temática estrita ao escopo desta pesquisa, centrado na Logística de Última Milha associada ao e-commerce e à sustentabilidade urbana, nesse processo, foram excluídos 14 artigos que abordavam contextos logísticos não urbanos, estudos voltados exclusivamente ao transporte de longa distância ou pesquisas sem relação direta com os desafios operacionais da LUM. Assim, 54 artigos foram selecionados para leitura integral, possibilitando a extração e categorização dos principais temas, metodologias e resultados encontrados na literatura científica.

A partir desse portfólio refinado, realizou-se uma análise de conteúdo detalhada para mapear as variáveis críticas que influenciam o desempenho da última milha. As abordagens metodológicas identificadas serviram de subsídio conceitual para a modelagem dos cenários logísticos propostos nesta pesquisa. Desse modo, o embasamento sistemático garantiu o alinhamento das simulações com as práticas globais mais recentes. Por fim, esse arcabouço permitiu estruturar as diretrizes para a avaliação da sustentabilidade na realidade complexa da RMSP.

A partir dos 54 artigos considerados na literatura científica, categorizou-se eles em grupos com tópicos semelhantes, conforme divisão apresentada nos subitens discutidos a seguir.

5.1. Falhas de entrega

Em um cenário de crescimento exponencial do comércio eletrônico e da urbanização global, as falhas de entrega na última milha tornaram-se um dos desafios mais complexos e dispendiosos na logística urbana. A última milha, definida como o segmento final da cadeia de suprimentos que se estende do último centro de distribuição ou ponto de consolidação até o consumidor final, é caracterizada por ineficiências que resultam em altos custos e emissões CO₂ (Van Vliet *et al.*, 2025). Este segmento é crucial, pois a entrega bem-sucedida da encomenda ao destino preferencial do consumidor marca o seu término (Boysen; Fedtke; Schwerdfeger, 2021; Van Vliet *et al.*, 2025). A complexidade e a importância da última milha

demandam uma análise aprofundada das suas causas de falha, dos impactos gerados e das tecnologias mitigadoras aplicáveis.

As falhas de entrega na última milha representam um gargalo significativo nas operações logísticas urbanas, desencadeando uma cascata de problemas econômicos, ambientais (Giuffrida *et al.*, 2022). A natureza ineficiente deste segmento da cadeia de suprimentos é amplificada por fatores como a alta densidade de consumidores, o congestionamento do tráfego e as crescentes expectativas dos clientes por serviços de entrega rápidos e flexíveis (Assis *et al.*, 2022). A compreensão detalhada das causas subjacentes a essas falhas é o primeiro passo para o desenvolvimento de estratégias eficazes de mitigação, conforme os subitens a seguir.

5.1.1 Fatores comportamentais e insucesso na primeira tentativa de entrega

A LUM é reconhecida como o segmento final e fundamental da cadeia de suprimentos, estendendo-se do último ponto de distribuição até o consumidor final (Boysen, Fedtke; Schwerdfeger, 2021). Essa etapa, embora represente uma pequena fração da distância total percorrida pelo produto, é de importância estratégica imensurável, pois é o único ponto de contato físico entre a marca e o cliente após a compra. Portanto, o sucesso da LUM é decisivo para a satisfação do cliente, para a fidelização e para a construção da percepção de qualidade do serviço, atuando como um verdadeiro diferencial competitivo no cenário do e-commerce. No entanto, esta é uma etapa ineficiente, o que contribui para elevados custos e emissões CO₂ (Giuffrida *et al.*, 2022). As falhas na entrega são um contribuinte primário para essa ineficiência do processo, sendo definidas por uma complexa interação de fatores relacionados ao comportamento do consumidor, restrições operacionais e ambientais, e riscos de segurança.

A identificação e mitigação dessas causas são importantes para a competitividade das empresas de logística, a seguir, são detalhadas as principais causas de falhas na entrega, extraídas da literatura especializada. O insucesso da entrega na residência, frequentemente impulsionado pela ausência do consumidor no momento da chegada do veículo, é uma das causas mais significativas de falhas e ineficiência na LUM (Giuffrida *et al.*, 2022). Os custos logísticos operacionais são diretamente impactados pela taxa de falha na primeira tentativa de entrega. Esta taxa, por sua vez, é uma variável de entrada que, embora crucial, é pouco pesquisada e

inconsistente na literatura, apresentando uma variação ampla entre 11% e 30% (Alves *et al.*, 2022).

O insucesso da entrega na residência, frequentemente provocado pela ausência do consumidor no momento da entrega, configura-se como uma das causas mais relevantes de ineficiência na Logística de Última Milha (Giuffrida *et al.*, 2022). Para mitigar este problema central, soluções alternativas, como os Pontos de Coleta e Entrega (CDPs) ou os Armários de Entrega Automatizados (ADPs), têm sido propostas (Oliveira *et al.*, 2019; Sawik, 2024). Contudo, a adoção dessas alternativas não é isenta de barreiras. Estudos indicam que a aceitação do serviço de ADPs pelos clientes é dificultada por diversos fatores como a necessidade de viagens adicionais de coleta, a perda de contato humano, a complexidade do processo de recuperação, a falha de sistemas e o tempo de espera extra, o fato de serem inadequados para pacotes grandes e de formato irregular (Wang *et al.* 2022) além das questões de privacidade resultantes do compartilhamento de informações pessoais com os provedores de ADPs (Tsai; Tiwasing, 2021).

Essa limitação no uso de alternativas está fortemente enraizada nas preferências dos consumidores: estudos realizados em países de língua alemã e no Brasil demonstram que o modelo de entrega domiciliar é o preferencial, e que o custo de envio e o tempo de entrega são os atributos mais valorizados pelos consumidores, enquanto o impacto ecológico ocupa posição secundária na decisão de compra (Nogueira *et al.*, 2025).

Portanto, a falha de entrega é frequentemente uma consequência direta da incompatibilidade entre as expectativas de conveniência do consumidor e a disponibilidade real no momento da entrega presencial (Boysen; Fedtke; Schwerdfeger, 2021)

5.1.2 Riscos de segurança e contextos socioeconômicos

As falhas de entrega e as ineficiências na LUM são exacerbadas por restrições operacionais e desafios infraestruturais inerentes aos ambientes urbanos (Guo *et al.*, 2024). O congestionamento do tráfego, a poluição e as restrições de espaço são desafios que dificultam a eficiência logística e causam impactos negativos

significativos no ambiente urbano e na mobilidade (Guo *et al.*, 2024; Wang; Bae, 2021). A incerteza associada ao tempo de viagem e à demanda de clientes são fatores críticos que, se não considerados, prejudicam a robustez das soluções logísticas (Guo *et al.*, 2024).

Em resposta aos impactos ambientais, as autoridades locais frequentemente implementam regulamentos de acesso a veículos urbanos, como zonas de baixa emissão (LEZ) e restrições de tempo de entrega (Ahani *et al.*, 2023). Embora estas medidas visem a sustentabilidade, elas podem aumentar os custos de entrega e, potencialmente, interromper as operações logísticas especialmente quando as janelas de tempo são estreitas (Malafaia, Ribeiro; Fontes, 2024; Ahani *et al.*, 2023)

As características físicas das áreas urbanas, especialmente em centros históricos, impõem severas restrições que levam a falhas operacionais, os centros históricos são caracterizados pela baixa disponibilidade de estacionamento, o que frequentemente resulta em estacionamento ilegal de caminhões, e pela presença de ruas estreitas, que impactam significativamente a segurança e a caminhabilidade (Ceccato; Gastaldi, 2023).

A incerteza operacional, particularmente em relação aos tempos de manuseio, é uma causa de ineficiência negligenciada. A incorporação da incerteza nos tempos de carga/descarga e na velocidade de viagem é essencial para evitar resultados distorcidos na avaliação da viabilidade econômica e do desempenho dos sistemas de entrega (Ceccato; Gastaldi, 2023). Outra causa de falha está relacionada às limitações da tecnologia de entrega utilizada, por exemplo, embora as bicicletas de carga sejam promissoras, sua eficácia é mitigada pelo excesso de peso de carga, que reduz sua velocidade, e pela sua adequação apenas para pequenos volumes (Ceccato; Gastaldi, 2023).

Os riscos de segurança e ambientais são fatores centrais para as falhas de entrega. A forma como esses riscos são avaliados varia de acordo com o método de análise, evidenciando a complexidade de suas origens. Mismar (2022) demonstrou uma diferença significativa entre abordagens que consideram os riscos de forma independente e aquelas que os analisam como interdependentes, em rede.

Quando avaliados isoladamente, elementos como privacidade, riscos de TI e desastres naturais tendem a ser subestimados. Entretanto, ao serem examinados sob a perspectiva de interdependência, esses mesmos fatores revelam-se decisivos para

a vulnerabilidade do sistema. Isso indica que a falha não deve ser vista apenas como um evento pontual por exemplo, um roubo, mas também como uma fragilidade sistêmica vinculada à infraestrutura digital e a eventos externos imprevisíveis.

Em contraste, em contextos geográficos específicos, as falhas de entrega são dominadas por ameaças físicas. No Brasil, o roubo e o furto de carga representam um desafio persistente para a logística de última milha, especialmente em regiões periféricas de grandes centros urbanos, comprometendo a segurança e elevando os custos operacionais (Queiroz *et al.*, 2025). Silva e Sampaio (2023) identificaram múltiplos fatores que influenciam a severidade dos incidentes de roubo de carga na última milha em um varejista online proeminente no Brasil, incluindo a localização de ocorrência, o tipo de produto e o envolvimento da comunidade.

A distribuição em áreas de baixa renda, como favelas brasileiras, enfrenta desafios ainda mais agudos. Oliveira *et al.* (2021) e Pereira, Zuidgeest e Lima (2025) observaram que, nas áreas internas dessas regiões, a ausência de acessibilidade para veículos é uma causa fundamental de falha e complexidade na distribuição de mercadorias (Alves *et al.*, 2023; Pereira; Zuidgeest; Lima, 2025). Esta é uma falha de entrega estrutural, resultado de características urbanísticas e socioeconômicas, exigindo abordagens de logística simples e adaptadas ao contexto local (Oliveira *et al.*, 2021).

A análise da literatura revela uma convergência na identificação de causas de falhas que residem na ineficiência inerente ao modelo tradicional de entrega em casa. A principal manifestação dessa falha é o insucesso da primeira tentativa de entrega, com taxas que variam significativamente e impactam diretamente os custos e lucros (Alves *et al.*, 2022). Essa ineficiência impulsiona a busca por soluções alternativas.

Enquanto o enfoque global privilegia falhas de gestão de dados e eventos exógenos (Mismar; Shamayleh; Qazi, 2022), o cenário brasileiro evidencia a centralidade das falhas ligadas à segurança do transporte físico. Convergência e desafios nas soluções alternativas, embora a implementação de CDPs e ADPs visa reduzir a falha na entrega (Oliveira *et al.*, 2019), a literatura mostra que essas soluções introduzem seus próprios fatores de insucesso, como a baixa aceitação do cliente devido à necessidade de viagens adicionais de coleta e a inadequação para pacotes grandes (Wang *et al.* 2022) Além disso, a preferência do consumidor por conveniência de custo e tempo sobre o impacto ambiental limita a eficácia de medidas mais

sustentáveis que poderiam, indiretamente, reduzir as falhas operacionais causadas pelas restrições de tráfego (Nogueira *et al.*, 2025).

A necessidade de desenvolvimento de modelos mais precisos e direcionados através da coleta de mais dados empíricos, o que melhoraria a capacidade de previsão dos modelos de Rede Bayesiana de Crenças e reduziria a dependência de julgamentos de especialistas (Mismar; Shamayleh; Qazi, 2022). Hur e Won (2024) e Guo *et al.* (2024) indicam que a análise mais realista só é possível com dados de demanda reais de entregas de encomendas em redes de transporte efetivas, em vez de dados gerados aleatoriamente ou distribuídos uniformemente. Em particular, a taxa de falha na primeira tentativa de entrega é um parâmetro fundamental que ainda não foi suficientemente pesquisado (Alves *et al.*, 2022).

Outra lacuna importante reside na integração de problemas de design e planejamento operacional, como a combinação de problemas de roteirização com gestão de estoque, localização e agendamento (Liu *et al.*, 2022). A ausência de estudos comparativos de desempenho entre diferentes modelos de logística de entrega impede a compreensão de quando e sob quais circunstâncias cada modelo opera de forma mais eficiente (Liu *et al.*, 2022).

Finalmente, Ahani *et al.* (2023) destacam a necessidade de que os formuladores de políticas prevejam incentivos econômicos e financeiros para apoiar as empresas de transporte urbano de carga no cumprimento das medidas regulatórias, o que aponta para uma lacuna na pesquisa de políticas que mitiguem as falhas de entrega causadas pelo aumento dos custos operacionais decorrentes das regulamentações de acesso (Ahani *et al.*, 2023).

5.2. Sustentabilidade na logística de última milha

O fenômeno do comércio eletrônico e a urbanização crescente intensificaram o impacto da LUM, gerando externalidades negativas que afetam a habitabilidade e a qualidade de vida nas cidades (Giuffrida *et al.*, 2022;). Consequentemente, a sustentabilidade na LUM tornou-se um imperativo para empresas e administrações públicas, sendo que a avaliação da sustentabilidade é fundamentada na clássica tríade de pilares ambiental, social e econômico, que devem ser gerenciados de forma integrada para garantir a continuidade dos negócios e o bem-estar da sociedade (De Armas; Moreno; Pérez, 2025).

O pilar ambiental se concentra na minimização da poluição, das emissões de GEE (Gases de Efeito Estufa) e do consumo de combustíveis fósseis. O transporte rodoviário de mercadorias é um dos maiores emissores em áreas urbanas, sendo os Veículos Comerciais Leves (LCVs) e Veículos de Mercadorias Pesadas (VPMS) responsáveis por 20% a 25% das emissões totais de CO₂ urbanas, além de poluentes como NO_x e PM_{2.5}. A média de CO₂ emitido por encomenda na Europa é estimada em 194g (Alves *et al.*, 2022). Para uma análise de emissões robusta, é essencial adotar uma abordagem holística, que incorpore variáveis como terreno, distância, carga útil e taxas de consumo de combustível.

O pilar social aborda os impactos na sociedade, como congestionamento, ruído, segurança e equidade. O tráfego de carga urbana contribui para a redução da capacidade viária e a poluição sonora (Giuffrida *et al.*, 2022). Em centros históricos, a morfologia, caracterizada por ruas estreitas e pouca disponibilidade de estacionamento, afeta a segurança e a caminhabilidade (Ceccato; Gastaldi, 2023).

A equidade, como um componente social, pode ser inserida em modelos de otimização de roteirização visando assegurar que todos os clientes experimentem um atraso relativo de entrega justo (Wang. *et al* 2022). Contudo, em mercados emergentes, a segurança física domina o pilar social: por exemplo o roubo e furto de carga representam um desafio persistente para a LUM em comunidades periféricas de São Paulo (Queiroz *et al.*, 2025; Pereira; Zuidgeest; Lima, 2025).

O pilar econômico é muitas vezes considerado como o cerne da sustentabilidade, pois o objetivo fundamental de muitos modelos de otimização é atingir o menor custo total do sistema, incluindo custos de localização e roteirização (Wang; Bae, 2021). A LUM é reconhecida por sua ineficiência de custo. As Regulamentações de Acesso a Veículos Urbanos, como Zonas de Baixa Emissão (LEZ), embora promovam a sustentabilidade ambiental, aumentam os custos operacionais e podem forçar empresas a abandonar áreas urbanas restritas (Ahani *et al.*, 2023; Malafaia; Ribeiro; Fontes, 2024). A otimização de localização-roteirização (LRP) é essencial para a viabilidade econômica, sendo que a consideração da incerteza nos custos operacionais como o preço de aluguel de micro-hubs é um fator determinante na robustez dos modelos LRP (Jiao *et al.*, 2025; Wang; Bae, 2021).

Inovações tecnológicas promovem alternativas e aumentam a eficiência operacional, que são pilares essenciais para a sustentabilidade. Veículos alternativos e micromobilidade, além da eletrificação de frotas são estratégias central. Estudos de

otimização de frotas mistas e veículos a combustão, demonstram que, ao considerar as restrições de zonas de baixa emissão os veículos elétricos podem ser mais competitivos em termos de custo total (Bruglieri *et al.*, 2025; Skultéty; Beňová; Gnap, 2021). As bicicletas de carga, que operam com zero emissões, são particularmente eficazes em centros urbanos por superarem congestionamentos e restrições de estacionamento (Ceccato; Gastaldi, 2023). Um framework modelístico é necessário para estimar a parcela potencial de demanda que pode ser atendida por bicicletas de carga (Mantecchini, Nanni Costa; Rizzello, 2024).

Pontos de Coleta e Entrega como CDPs e *lockers* são alternativas cruciais à entrega em casa, pois reduzem significativamente as falhas de entrega. O potencial de benefício dessas alternativas é evidenciado por estudos que mostram resultados expressivos: o reuso de quiosques de jornal como CDPs, por exemplo, demonstrou reduções de cerca de 90% na distância percorrida e nas emissões de CO₂ (Niemeijer; Buijs, 2023; Oliveira *et al.*, 2019). Adicionalmente, outras simulações sobre a adoção de CDPs indicaram reduções que variam de 74% a 87% no consumo de combustível por pedido (Alves *et al.*, 2022).

A integração de drones (UAVs) com caminhões é promissora para a redução simultânea de CO₂ e tempo de entrega (Hur; Won, 2024; Guo *et al.*, 2024). Da mesma forma, o modelo ADRRPT, que combina Robôs de Entrega Autônomos (ADRs) com Transporte Público, objetiva minimizar o tempo total de viagem e o impacto ambiental (De Maio *et al.*, 2024). No entanto, para que o potencial dessas inovações seja plenamente explorado e integrado à prática logística, a pesquisa acadêmica precisa de maior clareza conceitual. A literatura sobre *drone delivery*, por exemplo, requer o desenvolvimento de um framework de classificação unificado para alinhar os modelos analíticos com os rápidos avanços tecnológicos e operacionais (Liu *et al.*, 2022).

A literatura recente destaca a relevância de uma abordagem multimodal integrada para mitigar os desafios de sustentabilidade da última milha. O uso combinado de bicicletas de carga, veículos elétricos, drones, robôs autônomos e até mesmo a infraestrutura do transporte público representa uma oportunidade de sinergia logística. Esses arranjos permitem reduzir custos operacionais, emissões e congestionamentos, ao mesmo tempo em que aumentam a flexibilidade e a resiliência dos sistemas de entrega. No entanto, a adoção dessas soluções ainda enfrenta desafios de viabilidade financeira, regulamentação e aceitação social, exigindo

modelos de negócios mais sustentáveis e políticas públicas de incentivo para garantir sua implementação em larga escala (Ceccato *et al.*, 2023; Wu *et al.*, 2025).

A sustentabilidade requer a otimização da rede logística aliada à integração das decisões de projeto. Nesse contexto, micro-hubs e Centros de Consolidação Urbana (CCUs) tornam-se elementos essenciais como pontos de transbordo para bicicletas de carga (Ceccato; Gastaldi, 2023). Contudo, a viabilidade financeira dos CCUs é extremamente desafiadora. Van Heeswijk *et al.* (2019) e Orhan *et al.* (2024) afirmam que os CCUs tendem ao fracasso do ponto de vista puramente financeiro, a menos que alcancem um alto volume de carga e recebam subsídios ou medidas administrativas de apoio. A inviabilidade é mais acentuada em cidades pequenas devido ao baixo volume de entregas (Orhan *et al.*, 2024).

Um aspecto adicional a ser considerado é o fenômeno do espalhamento logístico, caracterizado pela migração de centros de distribuição para áreas periféricas em busca de terrenos mais baratos e maior disponibilidade de espaço. Embora essa tendência reduza custos imobiliários das empresas, ela amplia as distâncias percorridas e aumenta a pressão sobre a infraestrutura viária, contribuindo para o congestionamento e para as emissões. A integração entre uso do solo urbano e logística é, portanto, fundamental, pois permite alinhar políticas de transporte, localização de hubs logísticos e padrões de mobilidade urbana, favorecendo soluções mais eficientes e sustentáveis (Kin *et al.*, 2024; (Regal; Feliu; Rodriguez, 2023).

Políticas públicas para intervenções regulatórias e de planejamento são essenciais para direcionar a sustentabilidade incluindo, regulações urbanas de acesso veicular e medidas como as zonas de baixa emissão de carbono para a melhoria da qualidade do ar (Fransen *et al.*, 2023; Malafaia; Ribeiro; Fontes, 2024). No entanto, o planejamento urbano eficaz deve utilizar dados em larga escala, como dados de registro de celular, para caracterizar padrões de mobilidade de carga e desenvolver políticas adaptadas à realidade local (Basso *et al.*, 2024).

Incentivos econômicos é uma recomendação central para que os formuladores de políticas prevejam incentivos econômicos e financeiros para apoiar as empresas na renovação de frotas e no cumprimento das regulamentações, mitigando o aumento dos custos operacionais decorrente das regulações urbanas de acesso veicular (Ahani *et al.*, 2023). A Tabela 1 sintetiza os principais pontos positivos e negativos associados à efetividade dessas políticas públicas, conforme identificado na literatura. Essa dualidade revela que, embora os marcos regulatórios tenham avançado na teoria, a

execução prática ainda esbarra em limitações estruturais que impedem a consolidação dos resultados esperados.

Quadro 1 - Pontos positivos e negativos de políticas públicas associadas a logística de last mile

Pontos Positivos	Autores Mencionados	Pontos Negativos	Autores Mencionados
Redução de Emissões e Poluição	Ceccato <i>et al.</i> (2023), Bruglieri <i>et al.</i> (2025), Ahani <i>et al.</i> (2023)	Aumento de Custos para Empresas	Ahani <i>et al.</i> (2023), Bruglieri <i>et al.</i> (2025), Perboli; Rosano (2019)
Redução do Congestionamento	West; Börjesson (2020), Rubino <i>et al.</i> (2025)	Desafios de Viabilidade Financeira de CCUs	Orhan <i>et al.</i> (2024)
Melhoria da Qualidade do Ar e Habitabilidade	Ceccato <i>et al.</i> (2023), Giuffrida <i>et al.</i> (2022)	Inequidade e Impactos Sociais Desiguais	Fransen <i>et al.</i> (2023), Wang (2021),
Estímulo à Inovação e Sustentabilidade da Frota	Ahani <i>et al.</i> (2023), Ceccato <i>et al.</i> (2023)	Falta de Adesão e Compliance	Rubino <i>et al.</i> (2025)
		Conflito de Objetivos e <i>Trade-offs</i> / Dependência do Contexto Local / Desafios de Novas Tecnologias (Drones e Robôs)	Rześny-Cieplińska; Szmelter-Jarosz (2021), Fransen <i>et al.</i> (2023), Kin <i>et al.</i> (2024), Engesser <i>et al.</i> (2023)

Fonte: elaborado pelo autor (2026)

Cidades como Paris e Roterdã demonstram a importância da integração da logística no planejamento urbano, incluindo a alocação de espaços para instalações logísticas urbanas, uma estratégia importante para combater o espalhamento logístico (Kin *et al.*, 2024). A sustentabilidade na LUM está repleta de *trade-offs*, sendo o mais notável o conflito entre o custo, a conveniência e o impacto ambiental, essa tensão fica evidente ao se analisar as estratégias de entrega adotadas. Os estudos convergem ao identificar o modelo tradicional de entrega em domicílio como a principal fonte de ineficiência e de externalidades negativas, como o aumento da poluição e do congestionamento (Giuffrida *et al.*, 2022).

A adoção de pontos de coleta e entrega alternativos e micromobilidade é amplamente aceita como a estratégia tecnicamente mais eficaz para redução de emissões e quilometragem (Niemeijer; Buijs, 2023); Oliveira *et al.*, 2019). Clientes priorizam a entrega em casa, o custo de envio e o tempo, acima do impacto ecológico

e da flexibilidade (Nogueira *et al.*, 2025; Peppel; Ringbeck; Spinler, 2022). Essa preferência mina a eficácia das soluções de consolidação que, embora ambientalmente superiores, exigem uma mudança no comportamento do usuário.

O contexto local e as especificidades das cidades possuem grande influência nas soluções de sustentabilidade adotadas pois, a solução exige um conjunto diversificado de ações (Fransen *et al.*, 2023). A geografia local determina a viabilidade das infraestruturas, por exemplo, os (CCUs) são inviáveis financeiramente em cidades pequenas, devido ao baixo nível de carga, como observado em Bergen, Noruega (Orhan *et al.*, 2024). Além disso, a presença de restrições morfológicas como ruas estreitas em Pádua, Itália valida o uso de bicicletas de carga em detrimento de veículos tradicionais (Ceccato; Gastaldi, 2023). A eficácia das políticas públicas, portanto, depende da capacidade de caracterizar a mobilidade e as restrições específicas de cada localidade através de dados reais (Basso *et al.*, 2024).

A busca da sustentabilidade na LUM é um objetivo complexo que exige a harmonização da otimização econômica com custos mínimos, da transição tecnológica (eletrificação), micromobilidade e da intervenção regulatória. O sucesso depende de o alinhamento de políticas públicas oferecer incentivos econômicos para a transição verde (Ahani *et al.*, 2023), ao mesmo tempo em que se gerencia o dilema entre a conveniência do consumidor e as soluções de entrega de baixo impacto.

A revisão da literatura aponta lacunas na pesquisa que se relacionam diretamente com a análise e mitigação das causas de falhas de entrega. Uma oportunidade de pesquisa primária é a necessidade de coleta de dados empíricos de campo para alimentar modelos de otimização mais realistas e precisos. A dependência atual de dados de demanda gerados aleatoriamente ou distribuídos uniformemente é uma limitação que compromete a validade dos resultados (Hur, 2024; Guo *et al.*, 2024).

5.3 Métodos de quantificação de emissão CO₂ utilizados na LUM

A sustentabilidade na Logística de Última Milha pode ser avaliada pelo equilíbrio entre os pilares econômico, ambiental e social. Dentre esses, o ambiental é comumente avaliada por meio da quantificação e mitigação das emissões de dióxido de carbono (CO₂) e de outros Gases de Efeito Estufa (GEE). A LUM, caracterizada pela alta frequência de entregas, congestionamentos urbanos e falhas nas entregas

domiciliares, apresenta reconhecida ineficiência operacional, sendo responsável por significativa parcela das emissões urbanas.

Diante desses desafios, a pesquisa científica tem se concentrado no desenvolvimento de métodos quantitativos de otimização, simulação e modelagem de sistemas dinâmicos voltados à redução de emissões e ao aumento da eficiência logística. O foco principal das avaliações quantitativas é a redução da quilometragem percorrida por veículo e, conseqüentemente, a diminuição das emissões de CO₂. A quantificação das emissões é fundamental, pois permite que os modelos de otimização tratem a sustentabilidade como uma função objetivo mensurável, isoladamente ou em conjunto com o custo operacional.

A otimização matemática, especialmente por meio do problema de roteirização de veículos e suas variantes, constitui a abordagem predominante para quantificar e minimizar emissões. Tais modelos traduzem a sustentabilidade ambiental em restrições ou em objetivos explícitos.

Problema de roteirização de veículos, a emissão de CO₂ é geralmente estimada a partir do consumo de combustível, incorporando fatores de emissão simplificados, característicos de abordagens macroscópicas de modelagem, nas quais as emissões são calculadas com base em parâmetros médios de consumo e deslocamento. Diversos estudos utilizam fatores de emissão predefinidos, geralmente expressos em quilogramas de CO₂ por quilômetro percorrido (kg CO₂/km). Esses fatores são obtidos em relatórios e bases de dados reconhecidas, como a International Post Corporation, DPDgroup e Deloitte. Mojtahedi et al. (2021) adotaram um coeficiente de emissão padrão para o diesel de 2,61 kg CO₂/litro.

Emissão baseada em consumo de combustível (Microscópica), modelos microscópicos oferecem maior precisão e permitem previsões em tempo real, entre os principais métodos, destacam-se:

- **Modelo Abrangente de Emissão Modal:** Calcula o consumo de combustível e, portanto, as emissões de CO₂ segundo a segundo, para veículos de distribuição urbana. O modelo requer parâmetros específicos do veículo, como coeficiente de fricção do motor, velocidade média, potência e taxa de consumo de combustível, sendo reconhecido como um dos modelos mais precisos de simulação de emissões.

- **Modelagem da Taxa de Consumo de Combustível:** A taxa de consumo de combustível (FCR_x) para um veículo do tipo x pode ser estimada por uma expressão linear que considera o peso do veículo (W_{xi}) em cada ponto de entrega, bem como as taxas de consumo para carga vazia (ROI_x) e carga máxima (ROF_x). Essa abordagem reconhece que o consumo e, por consequência, as emissões variam conforme o peso transportado e a eficiência energética do veículo.
- **Otimização Multiobjetivo de Emissões:** nos modelos de problema de roteirização de veículos, a inclusão das emissões possibilita que a sustentabilidade ambiental seja tratada como um dos objetivos de otimização, frequentemente em conjunto com o Custo Logístico. Wang *et al.* (2024) aplicaram o método de escalarização (soma ponderada) para transformar um problema biobjetivo (VKT e emissões de CO_2) em uma função de otimização única, utilizando pesos iguais para garantir uma avaliação equilibrada entre custos e impacto ambiental.
- **Modelagem Baseada em Simulação e Avaliação de Ciclo de Vida:** A simulação é um instrumento essencial para quantificar os impactos de novas soluções logísticas em cenários dinâmicos, permitindo a comparação de tecnologias alternativas sob perspectivas econômica e ambiental. A Análise de Ciclo de Vida (LCA) é uma metodologia amplamente utilizada para calcular as emissões de GEE em diferentes cenários logísticos. Os resultados são expressos em gramas de dióxido de carbono equivalente (gCO_2e), baseados no Potencial de Aquecimento Global em 100 anos (GWP100).

Gnoni *et al.* (2025) desenvolveram uma ferramenta de apoio à decisão baseada em simulação, voltada à comparação de veículos aéreos não tripulados e robôs autônomos de entrega em relação a veículos convencionais de combustão interna e elétricos. A abordagem considerou simultaneamente aspectos econômicos e ambientais, reforçando o potencial das tecnologias autônomas para mitigar emissões. Os impactos ambientais decorrentes das operações logísticas podem ser quantificados financeiramente, permitindo sua integração em análises de custo-benefício e em processos de Análise de Decisão Multicritério.

Ceccato e Gastaldi (2023) incorporaram na avaliação de custos a monetarização de externalidades, incluindo emissões, ruído e congestionamento. Essa abordagem viabiliza a comparação entre os custos ambientais indiretos de veículos convencionais

e de alternativas sustentáveis, como bicicletas de carga e veículos elétricos. A valoração econômica das externalidades torna o impacto ambiental mensurável e comparável no contexto da eficiência logística.

Uma avaliação ambiental requer a consideração do custo social do dióxido de carbono, que reflete os danos econômicos associados à emissão de uma tonelada de CO₂ na atmosfera. Os valores de referência são frequentemente baseados em publicações oficiais, como o Handbook on the External Costs of Transport da Comissão Europeia, o qual oferece estimativas monetárias padronizadas para emissões, ruído e congestionamento.

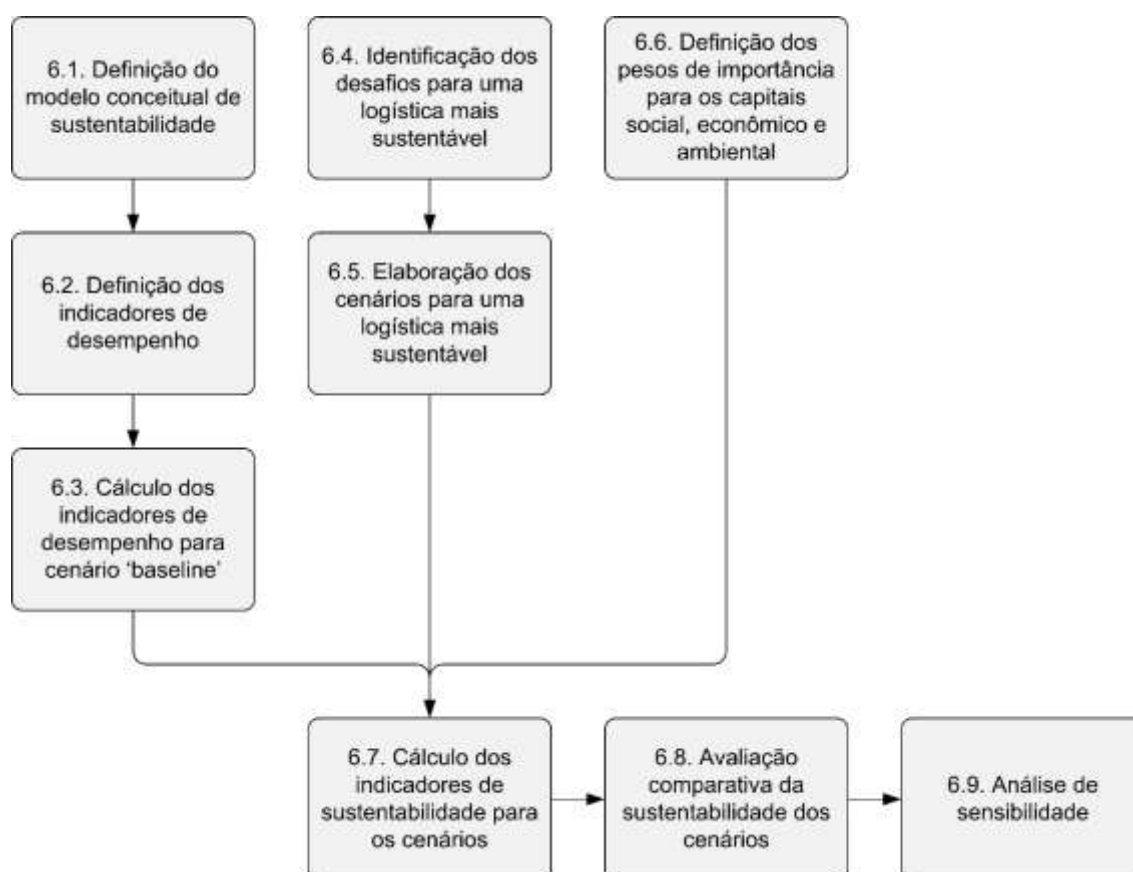
A avaliação da sustentabilidade na LUM apresenta convergência significativa na adoção de métodos quantitativos em especial a otimização e a simulação com foco na eficiência operacional e na redução de emissões. O objetivo de minimizar a quilometragem percorrida e as emissões de CO₂ é recorrente nos estudos de roteirização verde. Mesmo em sistemas avançados, como os que envolvem drones e robôs autônomos, a quantificação de emissões é geralmente vinculada ao consumo energético e à aplicação de fatores de conversão.

6. MÉTODO

A Figura 6 apresenta o fluxo metodológico das macros atividades desenvolvidas para a condução deste estudo, estruturado de forma a integrar os procedimentos qualitativos e quantitativos adotados para avaliar a sustentabilidade da LUM na RMSP. A abordagem quantitativa foi concebida em etapas interdependentes, permitindo a articulação entre a revisão da literatura, a identificação dos desafios, a atribuição dos pesos de importância dos capitais da sustentabilidade e a avaliação quantitativa dos cenários.

Nos itens a seguir, são apresentados de forma detalhada os procedimentos adotados em cada uma das etapas que compõem a Erro! Fonte de referência não encontrada.5, explicitando os critérios, métodos e decisões considerados ao longo do desenvolvimento do estudo. Essa descrição sistematizada tem como objetivo assegurar a compreensão do encadeamento metodológico, bem como a transparência e a reprodutibilidade das etapas analíticas empregadas.

Figura 5 - Esquema representativo das macros atividades do estudo.



6.1. Definição do modelo conceitual de sustentabilidade

O modelo conceitual de sustentabilidade proposto por John Elkington em 1997, conhecido como Triple Bottom Line (TBL) Figura 6, baseia-se em três dimensões interligadas, social, ambiental, econômico que redefinem o sucesso organizacional para além do lucro financeiro tradicional, e estabelece que o sucesso de uma organização não deve ser medido apenas pelo seu desempenho financeiro, mas também pelo seu desempenho social e ambiental. Este conceito desafiou a visão tradicional que focava exclusivamente no lucro econômico, introduzindo uma perspectiva mais abrangente da responsabilidade corporativa (Mejías; Paz; Pardo, 2016; Abraham, 2024).

Figura 6 - Representação das dimensões da sustentabilidade com base no modelo Triple Bottom Line



Fonte: Elaboração própria com base em Elkington (1997)

O modelo TBL mostra-se mais apropriado quando se busca avaliar aspectos logísticos, pois permite identificar *trade-offs* e sinergias entre eficiência operacional, impactos ambientais e bem-estar social. Essa abordagem é especialmente relevante no contexto da Logística de Última Milha, em que fatores como emissões de CO₂, custos operacionais e condições de trabalho coexistem e se influenciam mutuamente.

Conforme apontado por Werner-Lewandowska e Golinska-Dawson (2021), o TBL proporciona um instrumento conceitual eficaz para medir o desempenho

sustentável de organizações e sistemas logísticos, por meio de indicadores TBL, que representam simultaneamente resultados econômicos (ex.: custo por entrega, produtividade), ambientais (ex.: emissões, consumo energético) e sociais (ex.: qualidade do serviço, condições laborais). De forma semelhante, Zhang (2025) destaca que o modelo TBL é particularmente útil para analisar cadeias de suprimentos mais sustentáveis, pois integra métricas de desempenho em múltiplas dimensões, facilitando a tomada de decisão orientada em sustentabilidade.

Considerando as características intrínsecas dos sistemas logísticos, em especial aqueles associados à logística de última milha em ambientes urbanos, torna-se necessário adotar um modelo de avaliação de sustentabilidade capaz de capturar, de forma integrada, os múltiplos impactos gerados por essas operações. A literatura especializada em logística urbana e logística sustentável reconhece amplamente o TBL como um referencial conceitual robusto para a avaliação de desempenho em cadeias de suprimentos e sistemas de transporte (Giuffrida et al., 2022; Bosona, 2020).

O modelo TBL distingue-se, portanto, por sua capacidade de integrar múltiplas dimensões de desempenho em um mesmo arcabouço analítico, possibilitando a comparação sistemática de cenários logísticos alternativos. Essa integração é particularmente adequada para estudos que envolvem a avaliação de estratégias como eletrificação de frotas, uso de bicicletas de carga, pontos de coleta e entrega e medidas de segurança operacional, soluções amplamente discutidas na literatura como promissoras, mas que apresentam impactos heterogêneos sobre os diferentes capitais da sustentabilidade (Ceccato; Gastaldi, 2023; Bruglieri et al., 2025).

Dessa forma, a escolha do modelo Triple Bottom Line neste estudo fundamenta-se na sua adequação conceitual aos sistemas logísticos, na ampla aceitação na literatura acadêmica sobre logística sustentável e logística urbana, e na sua capacidade de representar, de maneira integrada, os *trade-offs* econômicos, ambientais e sociais característicos da logística de última milha.

6.2. Definição dos indicadores de desempenho

Após definir o modelo conceitual de sustentabilidade, a definição de indicadores de desempenho é etapa fundamental para a mensuração da sustentabilidade na LUM,

os indicadores permitem traduzir a complexidade operacional em métricas objetivas, possibilitando o acompanhamento, a comparação e a avaliação de práticas logísticas sob as diferentes dimensões consideradas. De acordo com Beamon (1999), a seleção de indicadores deve considerar a relevância para o contexto, a facilidade de mensuração e a comparabilidade dos resultados. Na Logística de Última Milha, estudos (Gatta *et al.*, 2019) apontam grupos principais de indicadores de desempenho, esses indicadores possibilitam uma visão integrada da performance logística, permitindo compreender os *trade-offs* entre custo, tempo, impacto ambiental e benefícios sociais. O Quadro 2 sintetiza os indicadores mais recorrentes na literatura sobre LUM, classificados conforme as três dimensões do modelo TBL.

Quadro 2 - Indicadores mais recorrentes na literatura sobre LUM

Dimensão TBL	Indicador	Descrição	Unidade/Métrica	Referências
Econômica	Custo operacional médio por entrega	Custo total da operação dividido pelo número de entregas mede a eficiência econômica do sistema.	R\$/entrega	Beamon (1999); Gatta et al. (2019)
	Custo por km (ou por veículo-km)	Custo total depende da distância percorrida para comparar rotas e cenário.	R\$/km	Beamon (1999); Gössling, Kees e Litman (2022)
	Tempo médio de entrega / lead time last mile	Definição de tempo de despacho até entrega. Objetivo: medir produtividade e serviço. Inclusão: janelas de tempo e atendimentos.	min/entrega ou h/rota	Gnoni et al. (2025) Escudero-Santana et al. (2022)
	Taxa de entregas no prazo (On-time delivery)	Porcentagem de entregas no prazo acordado para medir	%	Kandula; Krishnamoorthy; Roy (2021)

		desempenho e confiabilidade.		
	Taxa de falha na primeira tentativa / reentrega	% de entregas não concluídas na 1ª tentativa mede custo oculto e impacto.	% ou tentativas/pedido	Lim; Wang; Webster (2023); Song et al. (2009)
Ambiental	Emissões de CO ₂	Emissões diretas de CO ₂ devem ser avaliadas para comparar cenários de impacto climático, excluindo emissões embutidas.	kg CO ₂ /km (ou kg CO ₂ /entrega)	Liimatainen et al. (2019); Li et al. (2021)
	Consumo de energia / combustível	Energia consumida na operação indica eficiência e ajuda a calcular emissões, excluindo consumo irrelevante.	L/100 km, MJ/km, kWh/km	Halldórsson; Wehner (2020); Bányai (2022)
	Poluentes locais (NOx, PM, etc.)	Emissões de poluentes do tráfego urbano são consideradas para políticas de qualidade do ar, com incertezas	g/km ou g/entrega	Khreis et al. (2023); Shafie; Mahmud (2020)
	Ruído	Nível de ruído do tráfego de entregas e paradas reflete incômodo urbano.	dB(A) ou proxy por classe viária	Paiva; Cardoso; Zannin (2019); Zamorano-González et al. (2021)
Social	Número de empregos diretos no setor	Postos de trabalho diretos visam capturar contribuição social e emprego	Empregos/ano	Hutchins & Sutherland (2008); Awasthi & Chauhan (2012)
	Segurança viária (acidentes/incidentes)	A taxa de acidentes reflete riscos sociais e	acidentes/10 ⁶ km; acidentes/entrega	Ngoc et al. (2022); De

		deve considerar registros confiáveis.		Siqueira et al. (2025)
	Satisfação do cliente / qualidade percebida	Medida da satisfação com a entrega, focando na satisfação do consumidor.	Escala Likert/NPS/%	Ge et al. (2021); Caberoy et al. (2025)
	Condições de trabalho (jornada/turnover/saúde ocupacional)	Definição de qualidade do trabalho para avaliar impacto social sobre trabalhadores em last mile.	h/semana; % turnover; afast./ano	Useche et al. (2025); Mbare (2023)

Fonte: Autor (2026)

Com base nos indicadores mais recorrentes identificados na literatura sobre sustentabilidade da logística de última milha, optou-se pela utilização de indicadores operacionalmente mensuráveis e comparáveis entre cenários, priorizando aqueles com maior aderência ao contexto da RMSP e viabilidade de obtenção de dados. Assim, foram selecionados indicadores capazes de representar, de forma integrada, os capitais econômico, ambiental e social, mantendo equilíbrio entre robustez analítica, simplicidade de operacionalização e potencial de replicabilidade do método, para alimentar o modelo conceitual de sustentabilidade estabelecido neste estudo. Dentre as opções do Quadro 2, optou-se por utilizar os seguintes indicadores:

- Capital Econômico: Custo Operacional Médio por Entrega (R\$/entrega) indicador de uso universal que reflete a eficiência financeira do sistema logístico (Beamon, 1999; Gatta *et al.*, 2019).
- Capital Ambiental: Emissões diretas de CO₂ (kgCO₂/km) métrica de referência internacional para mensurar impacto ambiental do transporte urbano (Liimatainen *et al.*, 2019).
- Capital Social: Número de Empregos Diretos no Setor (empregos/ano) indicador amplamente utilizado em estudos sobre sustentabilidade social e economia verde (Hutchins; Sutherland, 2008; Awasthi; Chauhan, 2012).

As emissões de CO₂ são basicamente resultado da queima de combustível fóssil (diesel e gasolina na maioria dos casos) e que está diretamente ligado a distância

percorrida. Assim, como a maioria das informações na literatura está relacionado à distância, que é direta e proporcionalmente relacionada às emissões de CO₂, decidiu-se usar a distância em km/ano como um proxy para o indicador de capital ambiental.

6.3. Cálculo dos indicadores de desempenho para cenário ‘baseline’

A Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) configura-se como o ecossistema logístico mais dinâmico da América Latina. Com uma população superior a 22 milhões de habitantes, a região demanda uma infraestrutura capaz de suportar a alta concentração do Produto Interno Bruto (PIB) nacional e o maior volume de consumo per capita do país (IBGE, 2022). A escolha da RMSP como estudo de caso justifica-se por sua extrema complexidade operacional, onde a densidade demográfica exige soluções de capilaridade que desafiam os modelos tradicionais de distribuição urbana.

A relevância deste recorte reside na escala das operações: a região concentra aproximadamente 40% do faturamento total do e-commerce brasileiro (EBIT/NIELSENIQ, 2024). Essa magnitude é acentuada pela necessidade de estratégias de entrega no mesmo dia, que dependem de uma rede integrada de micro-hubs urbanos para contornar gargalos de tráfego e restrições de circulação de veículos de carga. Assim, a eficiência na RMSP torna-se o principal indicador de competitividade para os grandes operadores logísticos do mercado.

A revisão de literatura acerca dos desafios da logística de última milha apresenta estreita correspondência com a realidade observada na capital paulista. Como megacidade, a RMSP concentra fenômenos críticos discutidos globalmente, como congestionamentos persistentes e diversidade socioeconômica significativa (Giuffrida *et al.*, 2022; Rubino *et al.*, 2025). Tais características impactam diretamente o desempenho operacional e ambiental, resultando em custos elevados e maiores emissões de poluentes (Ahani *et al.*, 2023). Além disso, a incidência recorrente de roubos de carga reforça a importância de análises sobre segurança e risco logístico (Queiroz *et al.*, 2025).

A heterogeneidade socioespacial da região marcada pela coexistência de áreas de alta renda e periferias com menor IDH constitui um laboratório urbano ideal para investigar como fatores territoriais e regulatórios influenciam a tentativa de adoção de práticas sustentáveis. Nesse contexto, o estudo de caso possibilita

observar empiricamente como as estratégias propostas na literatura internacional se comportam diante das especificidades locais.

A caracterização do sistema *baseline* adotado para este estudo baseia-se na operação de uma referência no setor de e-commerce e logística na América Latina, que utiliza um modelo de malha própria. Este sistema estrutura-se a partir de Centros de Distribuição (CDs) estratégicos e centros de última milha que otimizam a entrega final. Estima-se que, na RMSP, esse modelo sustente cerca de 35.000 postos de trabalho e movimente um volume anual de 250 milhões de pacotes, com um GMV (*Gross Merchandise Volume*) estimado entre R\$ 45 e R\$ 50 bilhões.

Contudo, essa escala implica desafios ambientais severos. Com uma frota percorrendo aproximadamente 180 milhões de quilômetros anuais na região, a pressão sobre os níveis de poluição é constante. Embora iniciativas de mitigação já ocorram como o uso de biometano e a introdução de frotas elétricas que evitam a emissão de mais de 14.000 toneladas de CO_2 por ano o sistema atual ainda possui uma dependência majoritária de modais a combustão fóssil.

Diante da complexidade em obter valores absolutos precisos e proprietários sobre custo operacional e consumo energético detalhado, o cenário *baseline* foi consolidado como a representação da condição atual das operações na RMSP. Para viabilizar a análise, adotou-se uma abordagem de normalização por indexação, na qual os valores do cenário *baseline* foram fixados em 100 para cada indicador principal (custo, emissões e emprego).

Essa escolha metodológica, amplamente utilizada em simulações de sistemas complexos, permite que a análise seja conduzida em termos relativos. A abordagem de normalização por indexação adotada neste estudo está alinhada com práticas consolidadas na literatura de logística urbana e avaliação de sustentabilidade, nas quais indicadores são frequentemente ajustados para permitir comparações relativas entre cenários (Bosona, 2020). Em contextos caracterizados pela limitação de dados operacionais absolutos, a utilização de valores de referência e análise baseada em variações proporcionais é amplamente empregada em estudos de logística urbana e transporte de cargas (Allen *et al.*, 2018).

Dessa forma, os cenários alternativos são modelados por meio de variações percentuais em relação ao sistema *baseline*, garantindo consistência técnica e rigor científico na avaliação dos impactos das intervenções propostas.

6.4. Identificação dos desafios para uma logística mais sustentável

Os desafios foram obtidos a partir da mesma base de artigos identificada na revisão sistemática da literatura, sendo posteriormente organizados por meio de análise qualitativa de conteúdo, com foco nos fatores operacionais, ambientais, sociais e regulatórios que comprometem a sustentabilidade das operações de última milha.

Inicialmente, os artigos selecionados foram examinados com o objetivo de identificar problemas recorrentes reportados na literatura científica relacionados à logística urbana de entregas. Durante essa etapa, foram observados padrões de recorrência em temas como falhas na primeira tentativa de entrega, congestionamento urbano, restrições regulatórias ao tráfego de veículos de carga, emissões de gases de efeito estufa, riscos de segurança logística e dificuldades operacionais em áreas urbanas densamente povoadas.

Posteriormente, os desafios identificados foram agrupados por similaridade temática conforme Quadro 3, permitindo a consolidação dos principais entraves associados ao contexto da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). Essa consolidação considerou não apenas a frequência dos temas na literatura, mas também sua aderência às características urbanas e logísticas observadas no estudo de caso.

Quadro 3 - Principais desafios da logística de última milha identificados na literatura e seus focos analíticos

Tema	Artigos Recorrentes (Autores,Ano)	Foco Principal
Falhas na primeira tentativa de entrega	Rautela; Janjevic; Winkenbach (2022) ; Alves et al. (2023)	Impacto econômico das reentregas e eficácia do uso de armários inteligentes (lockers) como solução
Congestionamento urbano	; Orhan et al. (2024) ; Galkin et al. (2025)	Efeitos da crescente frota de entregas no trânsito e o impacto da consolidação de cargas na habitabilidade das cidades

Restrições regulatórias ao tráfego	Fransen et al. (2023); Galkin et al. (2025)	Implicações operacionais de políticas como Zonas de Baixa Emissão (LEZ) e Regulações de Acesso de Veículos Urbanos (UVAR)
Emissões de gases de efeito estufa	Temporelli et al. (2022); Niemeijer e Buijs (2023)	Quantificação da pegada de carbono da última milha e redução de emissões via bicicletas e pontos de coleta
Riscos de segurança logística	Silva;Sampaio (2023) ;Queiroz et al. (2025)	Fatores operacionais e estratégias de mitigação para o roubo de carga no e-commerce, com forte ênfase no cenário brasileiro
Dificuldades operacionais em áreas densas	Muriel et al. (2022); Chang, Jo e Lee (2021)	Desafios como ruas estreitas, falta de áreas de carga/descarga e o comportamento do consumidor, que exigem novas abordagens de roteirização.

Elaborado pelo autor com base nos estudos revisados (2026)

Adicionalmente, os achados da revisão foram complementados por evidências qualitativas obtidas por meio de entrevista semiestruturada com um gestor do setor logístico, cujo roteiro encontra-se apresentado no Apêndice A permitindo confrontar os desafios identificados na literatura com a realidade operacional observada no contexto da logística de última milha.

Como resultado desse processo, foram consolidados quatro desafios centrais: (i) falhas de entrega associadas à ausência do destinatário; (ii) congestionamento urbano e baixa eficiência operacional; (iii) restrições regulatórias e ambientais relacionadas à circulação de veículos; e (iv) riscos de segurança logística, especialmente associados a roubos e furtos de carga. Esses desafios serviram como fundamento para a construção dos cenários alternativos apresentados na seção seguinte, posteriormente, os dados obtidos foram organizados e analisados de forma comparativa entre teoria e prática, permitindo a consolidação dos principais desafios observados no contexto investigado. Como resultado, foram identificados quatro desafios centrais da logística de última milha:

- a) ausência do destinatário;
- b) trânsito urbano;
- c) zonas de circulação restritiva;
- d) segurança das operações.

Tais dimensões foram consideradas como base analítica para a construção dos cenários de melhorias e para a avaliação das estratégias mitigadoras propostas ao longo deste estudo.

6.5. Elaboração dos cenários para uma logística mais sustentável

A elaboração de cenários constitui uma etapa essencial do processo metodológico, pois permite projetar alternativas de ação e visualizar os possíveis desdobramentos das estratégias voltadas à sustentabilidade na LUM superando os quatro desafios previamente identificados. Segundo Godet (2000), o método de cenários é uma ferramenta prospectiva que auxilia na compreensão das incertezas e na formulação de políticas mais robustas frente a contextos complexos. No presente estudo, os cenários são utilizados como instrumentos para propor soluções práticas, focando exclusivamente na fase de operação e desconsiderando os custos de implementação inicial.

Cada cenário é construído com base em um dos quatro desafios específicos para a LUM, conforme identificado anteriormente, de modo que sua formulação busca responder a uma questão central: “Como este desafio poderia ser superado de forma mais sustentável na fase operacional?”. Assim, os cenários têm caráter exploratório e comparativo, permitindo analisar o comportamento das variáveis de desempenho representadas pelos indicadores TBL (econômico, social e ambiental) em diferentes condições de operação aqui estabelecidos.

Os cenários são propostos pelo autor dessa dissertação, considerando sua expertise, mas principalmente baseando-se nos dados disponíveis da literatura científica conforme revisão sistemática da literatura. A estruturação dos cenários segue os seguintes princípios:

- Vinculação direta ao desafio identificado: Cada cenário parte de um problema logístico concreto como, congestionamento, emissões, falhas de entrega, considerando-o como elemento de suporte para a proposição das alternativas.

- Base conceitual e empírica: A formulação de cada cenário é fundamentada em evidências extraídas da literatura científica sobre práticas consideradas mais sustentáveis em logística urbana, transporte de última milha e gestão de cadeias de suprimentos.
- Coerência com o modelo TBL: Os impactos de cada cenário são avaliados em relação às três dimensões da sustentabilidade (econômica, ambiental e social) a fim de identificar eventuais *trade-offs* e sinergias entre os capitais de sustentabilidade.
- Foco na fase operacional: A análise dos cenários concentra-se exclusivamente nos custos e benefícios operacionais contínuos, desconsiderando investimentos iniciais em infraestrutura, frota ou tecnologia. Embora limitada essa abordagem permite uma avaliação clara do impacto das mudanças nas operações diárias da logística de última milha.
- Viabilidade prática e reprodutibilidade: As proposições consideram soluções de baixa complexidade operacional e são inspiradas em práticas já implementadas ou em estudo avançado conforme literatura, sendo passíveis de implementação por operadores logísticos atuantes no e-commerce brasileiro.

Desse modo, os cenários não representam previsões determinísticas, mas situações hipotéticas fundamentadas que permitem avaliar a viabilidade e os efeitos de estratégias para tentar alcançar maior sustentabilidade em diferentes contextos da Logística de Última Milha. A comparação entre os cenários possibilita identificar alternativas de melhoria que conciliem desempenho operacional, responsabilidade ambiental e contribuição social, princípios centrais do modelo TBL adotado nesta pesquisa.

6.6. Definição dos pesos de importância para os capitais social, econômico e ambiental

A presente seção descreve os procedimentos metodológicos empregados para a determinação dos pesos de importância dos capitais econômico, ambiental e social na avaliação da sustentabilidade aplicada à Logística de Última Milha. O método adotado é o Analytic Hierarchy Process (AHP), desenvolvido por Thomas L. Saaty (1980), amplamente utilizado para auxiliar na tomada de decisão multicritério em

problemas complexos. O AHP permite estruturar o problema em níveis hierárquicos e transformar julgamentos qualitativos de especialistas em valores quantitativos, possibilitando a comparação entre critérios e a atribuição de pesos de importância relativos (Saaty, 1980).

Inicialmente, o problema de decisão foi decomposto em níveis hierárquicos. No primeiro nível definiu-se o objetivo global: avaliar a sustentabilidade logística. No segundo nível, incluíram-se os critérios principais, representando os três capitais fundamentais da sustentabilidade: econômico, ambiental e social. Essa estrutura foi concebida de forma a refletir a interdependência entre o objetivo e as dimensões avaliadas, tornando o problema mais compreensível e sistemático conforme sugerido por (Saaty;Vargas 2012).

A coleta de dados baseia-se em questionários de comparações pareadas, Apêndice B, respondidos por especialistas da área de logística e da engenharia de produção. A amostra é composta por profissionais com experiência comprovada em planejamento logístico e acadêmicos de engenharia de produção, conforme Tabela 1 garantindo diversidade de perspectivas.

Para operacionalizar a aplicação do método, os questionários foram estruturados conforme a lógica hierárquica do AHP, permitindo aos especialistas avaliar progressivamente critérios, subcritérios e alternativas de entrega. Essa decomposição reduz a complexidade do processo decisório e favorece maior clareza nos julgamentos realizados. Além disso, a estrutura hierárquica contribui para explicitar as relações entre os objetivos da pesquisa e os elementos avaliados, aumentando a consistência analítica do modelo.

Tabela 1 - Grupo de especialistas

Grupos	Posição do especialista entrevistado	Quantidade de respondentes	Experiência em anos
Grupo A	Prof.Dr. Engenharia de Produção	3	15
Grupo B	Supervisor de Operações Logísticas	1	7
	Coordenador de Operações Logísticas	1	5

Fonte: Autor (2026)

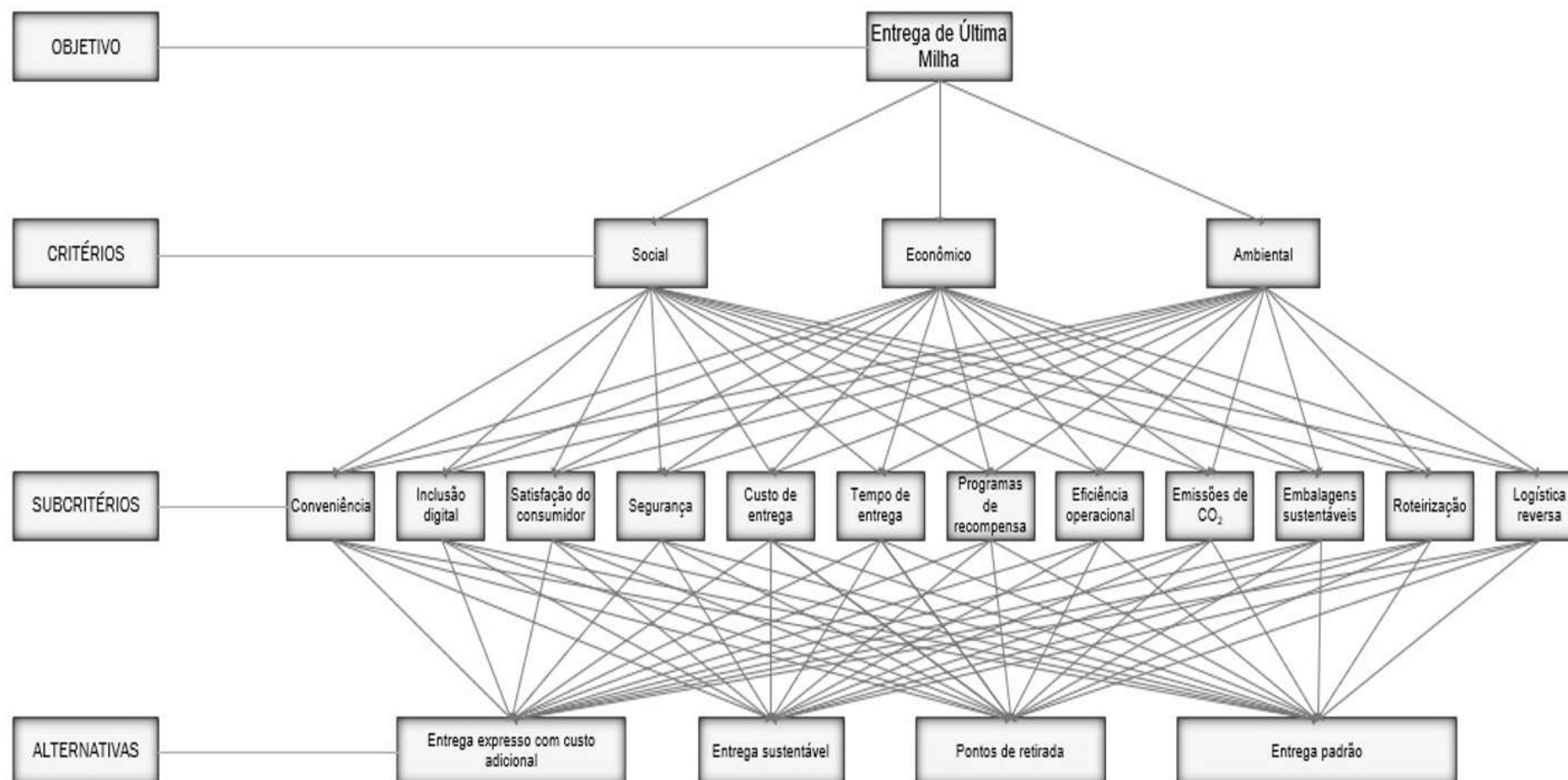
Figura 7 apresenta a estrutura hierárquica do modelo de decisão multicritério aplicado à avaliação da sustentabilidade na entrega de última milha, construída com base no método AHP. No nível superior, define-se o objetivo central, que consiste na seleção da melhor alternativa de entrega de última milha sob a ótica da sustentabilidade. No segundo nível, são estabelecidos os critérios principais, organizados em três dimensões fundamentais: social, econômica e ambiental. Esses critérios estruturam a análise e orientam a decomposição do problema decisório. No terceiro nível, a figura detalha os subcritérios, que operacionalizam cada dimensão.

Na dimensão social, incluem-se aspectos como conveniência, inclusão digital, satisfação do consumidor e segurança. Na dimensão econômica, são considerados fatores como custo de entrega, tempo de entrega, programas de recompensa e eficiência operacional. Já na dimensão ambiental, destacam-se emissões de CO₂, uso de embalagens mais sustentáveis, roteirização e logística reversa. Esses subcritérios permitem uma avaliação mais detalhada e específica dos impactos associados a cada alternativa. Por fim, no nível inferior da hierarquia, são apresentadas as alternativas de decisão, que incluem: entrega expressa com custo adicional, entrega sustentável, pontos de retirada e entrega padrão com programa de retirada. Todas as alternativas são avaliadas em relação a cada subcritério, conforme indicado pelas múltiplas conexões da figura, caracterizando a aplicação completa do método AHP.

A organização hierárquica proposta permite representar de forma estruturada a complexidade inerente ao problema analisado, facilitando a comparação entre critérios de naturezas distintas. Além disso, a decomposição em níveis contribui para reduzir a subjetividade do processo decisório, uma vez que os julgamentos são realizados de maneira sistemática e gradual. Essa estrutura também favorece a incorporação da percepção de especialistas, permitindo que diferentes perspectivas sejam consideradas na atribuição dos pesos relativos. Dessa forma, o modelo possibilita integrar simultaneamente aspectos econômicos, sociais e ambientais em uma única análise. A hierarquia adotada ainda proporciona transparência ao processo de avaliação, tornando explícitas as relações entre critérios, subcritérios e alternativas.

Consequentemente, os resultados obtidos refletem uma visão abrangente dos fatores que influenciam a logística de última milha. Tal abordagem é particularmente relevante em contextos urbanos complexos, nos quais decisões logísticas envolvem múltiplos objetivos e interesses frequentemente conflitantes.

Figura 7 - Estrutura hierárquica de decisão do modelo AHP



Fonte: Autor (2026)

Dessa forma, cada participante realiza comparações dois a dois entre os elementos de cada nível hierárquico (critérios, subcritérios e alternativas), atribuindo valores de acordo com a escala fundamental de Saaty, variando de 1 a 9, na qual 1 representa igual importância e 9 indica importância extrema de um critério sobre o outro. Essa abordagem permite capturar a percepção subjetiva dos especialistas e transformá-la em dados estruturados, possibilitando o cálculo dos pesos relativos, a verificação da consistência dos julgamentos e o ranqueamento das alternativas conforme a avaliação dos especialistas. Com as respostas obtidas, foram elaboradas matrizes de comparação par a par ($A = [a_{ij}]$), nas quais cada elemento a_{ij} representa o grau de preferência do critério i sobre o critério j . O princípio de reciprocidade foi aplicado, ou seja, $a_{ji} = 1 / a_{ij}$.

As matrizes individuais são posteriormente agregadas por meio da média geométrica dos julgamentos dos especialistas, conforme recomendado por Saaty (1980), de modo a obter uma matriz de consenso representativa do grupo. Essa etapa assegura a coerência coletiva dos julgamentos e reduziu a influência de valores extremos.

A partir da matriz de consenso, os pesos relativos (w_i) de cada critério são finalmente obtidos pelo processo de normalização e cálculo da média aritmética das linhas. Esses valores indicam o grau de importância de cada dimensão, econômica, social, ambiental, em relação ao objetivo geral da avaliação de sustentabilidade na logística de última milha.

O cálculo pode ser representado conforme: $w_i = (1/n) \sum [a_{ij} / \sum a_{ij}]$. Para garantir a validade dos resultados, foi calculado o Índice de Consistência (CI) e o Índice de Consistência Relativo (CR), conforme proposto por Saaty (1980): $CI = (\lambda_{max} - n) / (n - 1)$, $CR = CI / RI$. A condição $CR \leq 0,10$ é adotada como limiar aceitável de coerência. Quando o valor de CR ultrapassou esse limite, os julgamentos são revisados pelos especialistas, conforme prática usual em aplicações do AHP (Gomes; Araya; Carignano, 2004).

6.7 Cálculo e avaliação comparativa dos indicadores de sustentabilidade dos cenários

Apresenta-se aqui o procedimento para o cálculo dos indicadores de sustentabilidade para cada um dos cenários elaborados, os quais visam propor soluções para os desafios identificados na LUM conforme apresentado anteriormente. Para cada cenário, os indicadores de desempenho (KPIs) a serem estimados são: emissões diretas de kgCO_2 /ano, número de empregos/ano e custo operacional/ano. Esses KPIs representam, respectivamente, os capitais ambiental, social e econômico do modelo de sustentabilidade Triple Bottom Line (TBL) adotado neste estudo.

O cálculo dos KPIs para cada cenário é realizado com base na descrição detalhada de suas operações e nas projeções de mudança em relação aos valores do Cenário #0 (Baseline). Em outras palavras, os KPIs dos cenários são estimados de forma relativa aos KPIs do baseline, em porcentagem de aumento ou redução. Para tal, são utilizados dados provenientes da literatura científica e, quando aplicável, de literatura cinza validados pelo autor da dissertação, que inclui relatórios setoriais e estudos de caso relevantes para o contexto da LUM. Além disso, para incorporar uma perspectiva prática e contextualizada, as estimativas de mudança nos valores dos KPIs são subsidiadas pela experiência do autor desta dissertação. Esta abordagem permite refinar as estimativas e garantir que os cenários reflitam realidades operacionais.

Foi empregada a simulação de Monte Carlo como técnica de apoio à modelagem quantitativa. A utilização desse método justifica-se pelo fato de que os parâmetros considerados no estudo não são tratados como valores fixos, mas sim como faixas percentuais de variação, representando possíveis oscilações nos resultados decorrentes de diferentes condições operacionais e estratégicas da LUM. Nesse contexto, para cada indicador foram estabelecidos intervalos de variação percentual, definidos a partir das evidências obtidas na literatura e do estudo de caso, contemplando tanto reduções quanto aumentos esperados nos valores de referência. A simulação de Monte Carlo permite, portanto, transformar essas faixas em distribuições probabilísticas, possibilitando a geração de múltiplos cenários possíveis e a avaliação do comportamento do índice de sustentabilidade sob condições de incerteza.

Para a operacionalização do método, foi definida uma função de probabilidade triangular para representar a distribuição dos valores dentro das faixas percentuais estabelecidas. A partir dessa função, foram realizadas 10.000 repetições (iterações), número considerado adequado para garantir estabilidade estatística e robustez dos resultados. Em cada repetição, o modelo realiza um sorteio aleatório dos valores dos parâmetros dentro dos limites definidos, recalculando o índice de sustentabilidade para cada cenário proposto.

A adoção de 10.000 iterações permite reduzir a influência de oscilações aleatórias e aumentar a confiabilidade dos resultados, possibilitando a obtenção de medidas estatísticas como média, mediana, desvio padrão e intervalo de confiança de 95%. Dessa forma, a simulação fornece não apenas um valor pontual para cada cenário, mas uma distribuição probabilística completa dos resultados, permitindo analisar simultaneamente desempenho médio e variabilidade.

Todo o procedimento de simulação de Monte Carlo foi desenvolvido por meio de código em linguagem Python, devido à sua flexibilidade para modelagem estatística e manipulação de dados. O algoritmo foi implementado e executado no ambiente IDLE (Integrated Development and Learning Environment), utilizando rotinas específicas para geração de números aleatórios e repetição iterativa do modelo. Essa abordagem assegura reprodutibilidade metodológica e transparência no processamento dos dados.

Uma vez estimados, os KPIs de cada cenário necessitam ser normalizados. A normalização é uma etapa essencial, pois os indicadores (emissões de CO₂, número de empregos e custo operacional) estão em escalas e unidades de medida completamente diferentes. O objetivo da normalização é transformar esses valores para uma escala comum entre 0 e 1, permitindo que sejam comparáveis e agregados de forma mais consistente. O método de normalização empregado é o Min-Max (Feature Scaling), conforme a Eq.1.

$$I_{normalizado} = \frac{(I_{max} - I_{min})}{(I - I_{min})} \quad \text{Eq. (1)}$$

Onde:

I = representa o valor atual do indicador para um dado cenário.

I_{min} = corresponde ao valor mínimo esperado para o indicador entre todos os cenários avaliados (incluindo o baseline).

I_{max} = corresponde ao valor máximo esperado para o indicador entre todos os cenários avaliados.

As principais vantagens da normalização Min-Max incluem sua simplicidade e intuitividade, resultando em valores que se situam convenientemente entre 0 e 1. Contudo, é importante reconhecer que este método é sensível a valores extremos (outliers) e exige que os limites I_{min} e I_{max} sejam definidos de forma cuidadosa e justificada para o contexto do estudo.

É importante, ainda, considerar a natureza de cada indicador em relação à sustentabilidade. Para indicadores nos quais um valor menor representa uma melhor performance em sustentabilidade (como o custo operacional e as emissões de CO_2), a lógica de normalização deve ser invertida. Assim, um valor normalizado mais alto continuará a indicar uma "maior sustentabilidade". Nesses casos, a fórmula utilizada será a da Eq. 2. Esta inversão garante que todos os indicadores normalizados reflitam positivamente o aumento da sustentabilidade, independentemente da sua natureza original, ou seja, se "maior é melhor" ou "menor é melhor".

$$I_{normalizado} = \frac{(I_{max}-I)}{(I_{max}-I_{min})} \quad \text{Eq. (2)}$$

Após a normalização, todos os indicadores estarão em uma escala comparável, permitindo sua agregação para a construção de um Índice Relativo de Sustentabilidade. A abordagem considerada neste estudo é o Modelo de Soma Ponderada (Weighted Sum Model), cuja fórmula geral para o cálculo do Índice Relativo de Sustentabilidade (S) considerado é apresentada na Eq. (3)

$$S = \sum_{i=1}^n (w_i I_{i,normalizado}) \quad \text{Eq. (3)}$$

Onde:

S = representa o índice relativo de sustentabilidade para o cenário avaliado.

w_i = é o peso atribuído ao indicador i . Esses pesos refletem a importância relativa de cada dimensão da sustentabilidade (ambiental, social, econômica), conforme determinado método Analytic Hierarchy Process (AHP).

$I_{i,normalizado}$ = é o valor normalizado do indicador i .

n = corresponde ao número total de indicadores considerados (neste estudo, $n=3$: ambiental, social e econômico).

Importante destacar que a soma de todos os pesos ($w_1+w_2+\dots+w_n$) seja igual a 1, garantindo que o índice de sustentabilidade represente uma ponderação balanceada das diferentes dimensões. Este índice S permitirá a avaliação

comparativa da sustentabilidade entre o Cenário Baseline e os cenários de melhoria propostos.

Essa comparação possibilita analisar, de forma integrada, quais cenários apresentam maior ou menor desempenho relativo de sustentabilidade no contexto da logística de última milha da Região Metropolitana de São Paulo, considerando os pressupostos metodológicos adotados, as incertezas incorporadas pela simulação de Monte Carlo e os pesos atribuídos aos capitais da sustentabilidade pelo método Analytic Hierarchy Process (AHP).

6.8 Análise de sensibilidade sob diferentes perfis de ponderação

Com o objetivo de avaliar a influência da estrutura de preferências sobre os três capitais para o cálculo do índice relativo de sustentabilidade S, foi realizada uma análise de sensibilidade por perfis dirigidos de pesos. Diferentemente da simulação probabilística, cujo foco é captar a incerteza associada às variações simultâneas dos parâmetros, essa etapa buscou representar orientações decisórias distintas, verificando como o desempenho dos cenários logísticos se altera quando há maior prioridade relativa para cada dimensão da sustentabilidade.

Como referência, adotaram-se os pesos obtidos por meio do Analytic Hierarchy Process (AHP), os quais refletem a percepção dos especialistas consultados no estudo. O vetor resultante para o perfil economicamente dominante foi composto por 0,614 para o capital econômico, 0,268 para o capital social e 0,118 para o capital ambiental conforme. Estes valores são resultados da aplicação do AHP e apresentados na seção de discussões, mas antecipa-se aqui o resultado para explicar o método.

Além do perfil de referência, considerado como o perfil econômico foi incluído um perfil equilibrado, no qual os três capitais receberam a mesma importância relativa, com pesos de 0,333 para o capital econômico, 0,333 para o capital social e 0,333 para o capital ambiental. A inclusão desse perfil teve como finalidade representar uma condição teórica de equilíbrio entre as três dimensões da sustentabilidade, permitindo comparar os resultados obtidos sob uma lógica decisória sem predominância explícita de qualquer capital. A partir desse vetor de referência, foram ainda definidos dois perfis dirigidos adicionais, com o propósito de representar situações em que a decisão

seja orientada prioritariamente para as dimensões social e ambiental, respectivamente. Assim, foram considerados os seguintes perfis:

- Perfil economicamente dominante: econômico = 0,614, social = 0,268, ambiental = 0,118; AHP atual, como será apresentado e discutido a posteriori;
- Perfil equilibrado: econômico = 0,333, social = 0,333, ambiental = 0,333;
- Perfil socialmente dominante: econômico = 0,300, social = 0,550, ambiental = 0,150;
- Perfil ambientalmente dominante: econômico = 0,250, social = 0,200, ambiental = 0,550.

A definição desses perfis procurou atender simultaneamente a quatro critérios metodológicos: soma unitária dos pesos, predominância clara da dimensão priorizada, manutenção da relevância das demais dimensões e facilidade de interpretação comparativa dos resultados. Dessa forma, evitou-se tanto a adoção de perfis excessivamente extremos, que poderiam comprometer a plausibilidade analítica, quanto a utilização de perfis muito próximos entre si (com exceção do perfil equilibrado), o que reduziria a capacidade discriminatória da análise.

Para cada perfil de pesos, o índice relativo de sustentabilidade(S) foi recalculado para o cenário baseline e para os cenários alternativos de 1 a 4 avaliados, permitindo comparar não apenas os valores médios obtidos, mas também a mudança de ordenação entre os cenários em função da orientação decisória adotada. Com isso, torna-se possível identificar se determinado cenário apresenta desempenho superior apenas sob uma estrutura específica de preferências ou se mantém comportamento robusto mesmo quando há mudança de prioridade entre os capitais econômico, social e ambiental.

Essa abordagem permite aprofundar a interpretação dos resultados, uma vez que o cenário considerado mais sustentável deixa de ser analisado somente à luz do vetor de pesos originalmente obtido pelo AHP e passa a ser examinado também sob diferentes perspectivas de decisão. Em termos analíticos, isso possibilita responder se a superioridade de determinado cenário decorre de uma condição estrutural de desempenho ou se depende, em maior medida, do peso atribuído a cada dimensão da sustentabilidade.

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES PARCIAIS

7.1. Estabelecendo pesos de importância para os capitais econômico, social e ambiental

O objetivo desta etapa consiste em estabelecer os pesos de importância atribuídos aos capitais econômico, social e ambiental, de modo a representar quantitativamente as preferências e prioridades dos especialistas no modelo de decisão multicritério aplicado aos cenários de logística de última milha. A definição desses pesos permite identificar quais dimensões exercem maior influência na avaliação das alternativas, orientando a análise comparativa e a interpretação dos *trade-offs* envolvidos.

A estrutura hierárquica do *Analytic Hierarchy Process* (AHP) foi organizada em quatro níveis: objetivo global, critérios, subcritérios e alternativas. O primeiro nível corresponde ao objetivo central do modelo, que consiste na avaliação da sustentabilidade das alternativas logísticas de entrega. No segundo nível, encontram-se os critérios representados pelos capitais econômico, social e ambiental, enquanto o terceiro e o quarto níveis detalham, respectivamente, os subcritérios de análise e as alternativas de entrega avaliadas.

Entretanto, destaca-se que, para fins de cálculo do Índice Relativo de Sustentabilidade (S), foram utilizados exclusivamente os pesos obtidos no nível dos critérios conforme Tabela 2, com dados do Apêndice F uma vez que estes representam a importância relativa dos capitais da sustentabilidade no processo decisório. Os subcritérios e alternativas desempenham função complementar, sendo empregados para estruturar os julgamentos dos especialistas e conferir maior robustez à elicitação das preferências no AHP.

Tabela 2 - Pesos dos critérios utilizados no cálculo do Índice Relativo de Sustentabilidade (S)

Critério	Peso
Econômico	0,614
Social	0,268
Ambiental	0,117

Fonte: Autor (2026)

Os resultados gerais indicam predominância do critério econômico, seguido pelos critérios social e ambiental, evidenciando que fatores associados ao custo e à eficiência operacional ainda exercem maior influência sobre as preferências dos especialistas no contexto das alternativas de entrega avaliadas. Esse achado sugere que, em sistemas logísticos urbanos altamente competitivos, aspectos financeiros permanecem como fatores prioritários no processo decisório, resultado também observado na literatura, como em Silva *et al* (2023), que aponta custos operacionais e eficiência como elementos centrais na avaliação de soluções logísticas.

A análise detalhada dos subcritérios do capital econômico, Tabela 3 com dados do Apêndice F, evidencia que a eficiência operacional apresenta maior relevância dentro dessa dimensão, seguida pelos custos de entrega, indicando a preocupação dos especialistas com alternativas capazes de otimizar recursos e reduzir ineficiências operacionais.

Tabela 3 - Subcritérios do capital econômico

Critério Econômico (0,614)	Peso
Custo de Entrega	0,242
Eficiência Operacional	0,501
Tempo de Entrega	0,172
Programas de Recompensa	0,084

Fonte: Autor (2026)

Entre as alternativas avaliadas, observa-se maior destaque para os *smart lockers*, sobretudo nos subcritérios relacionados à eficiência operacional e ao custo de entrega, indicando potencial para racionalização das operações logísticas urbanas. Esse resultado converge com estudos que apontam sistemas de retirada automatizada como mecanismos capazes de reduzir falhas de entrega, otimizar rotas e melhorar a utilização dos ativos logísticos, como em Zhang e Demir (2025).

No âmbito do capital social, identificado como a segunda dimensão mais relevante no julgamento dos especialistas, verifica-se na Tabela 4 com dados do Apêndice F a predominância dos aspectos relacionados à segurança e à satisfação do cliente, reforçando a importância de fatores ligados à experiência do usuário e à confiabilidade da entrega.

Tabela 4 - Subcritérios do capital social

Critério Social (0,268)	Peso
Inclusão Digital	0,101
Conveniência	0,141
Segurança	0,483
Satisfação do Cliente	0,276

Fonte: Autor (2026)

A segurança apresenta maior relevância entre os subcritérios sociais, refletindo preocupações crescentes com a integridade das mercadorias e a confiabilidade do processo de entrega, sobretudo em ambientes urbanos complexos. Nesse contexto, alternativas como os *smart lockers* indica desempenho superior, possivelmente em razão da redução de riscos associados à ausência do destinatário e à vulnerabilidade operacional como reportado em Schnieder, Hinde e West (2021). Além disso, a satisfação do cliente apresenta forte associação com modalidades de entrega mais rápidas, indicando que a agilidade continua sendo um fator determinante na percepção de qualidade do serviço logístico como discutido por Deshpande e Pendem (2023). Em relação ao capital ambiental, embora este apresente menor influência relativa no processo decisório, os resultados da tabela 5 com dados do Apêndice F indicam que a emissão de

Tabela 5 - Subcritérios do capital ambiental

Critério Ambiental (0,117)	Peso
Emissão de CO ₂	0,483
Logística Reversa	0,176
Roteirização Verde	0,247
Embalagens Sustentáveis	0,094

Fonte: Autor (2026)

CO₂ emerge como o subcritério de maior relevância, evidenciando que impactos ambientais relacionados ao transporte urbano de cargas são reconhecidos pelos especialistas como um fator importante de análise. Nesse aspecto, a alternativa de entrega sustentável apresenta desempenho superior, sugerindo maior valorização de estratégias voltadas à redução das emissões e à mitigação dos impactos ambientais

da distribuição urbana, em consonância com estudos recentes sobre consumo sustentável e logística verde de Saha et al. (2023).

De forma geral, os resultados indicam que, embora haja crescente valorização dos aspectos ambientais e sociais, os fatores econômicos continuam exercendo maior influência sobre as decisões relacionadas às operações logísticas de última milha. Tal evidência sugere que a sustentabilidade, no contexto analisado, ainda é fortemente condicionada pela viabilidade operacional e financeira das soluções adotadas, reforçando a existência de *trade-offs* entre eficiência econômica, qualidade do serviço e desempenho ambiental.

7.2. Identificação dos desafios para uma logística mais sustentável

Os resultados obtidos no estudo evidenciam que a logística de última milha no contexto urbano da RMSP é marcada por desafios operacionais e ambientais que se manifestam de forma simultânea e interdependente. A análise realizada, fundamentada em revisão da literatura e em estudo de caso com um operador logístico atuante no e-commerce, permitiu identificar como principais obstáculos:

- O tráfego urbano;
- Zonas de restrição e circulação (zonas de baixa emissão e rodízio);
- Segurança da carga;
- Ausência do destinatário no momento da entrega;

Esses obstáculos se reforçam mutuamente e elevam a complexidade do planejamento de rotas, o custo logístico e a probabilidade de falhas operacionais, exigindo estratégias adaptativas por parte das empresas que operam na última milha.

Em termos práticos, os achados indicam que o tráfego urbano é um dos elementos mais críticos, pois impacta diretamente o tempo de viagem, a produtividade da frota, a previsibilidade de prazos e, conseqüentemente, o nível de serviço percebido pelo consumidor. Em uma cidade com alta densidade urbana e volume elevado de veículos, a eficiência logística torna-se fortemente dependente do contexto viário e das janelas de entrega disponíveis. Além disso, as zonas de restrição de circulação, associadas a políticas urbanas voltadas ao controle do fluxo e mitigação de impactos ambientais, impõem limites operacionais relevantes, demandando

roteirização diferenciada por tipo de veículo e adequações contínuas no planejamento das rotas.

Outro resultado relevante refere-se à ausência do destinatário, apontada como uma fonte importante de falhas de entrega e aumento de custo operacional. Isso ocorre porque entregas não concluídas tendem a gerar novas tentativas de entrega, resultando em maior quilometragem rodada e desperdício de capacidade logística.

Nesse sentido, o estudo evidencia que a adoção de pontos de coleta e entrega compartilhados, como armários inteligentes e redes de pontos parceiros, representa uma resposta prática e viável para reduzir falhas, consolidar entregas e minimizar deslocamentos desnecessários. Assim, além de contribuir para a eficiência econômica, esse tipo de solução também possui efeito positivo sobre o desempenho ambiental, especialmente no que se refere à redução de emissões associadas ao excesso de viagens.

No campo da segurança, os resultados confirmam que determinadas regiões urbanas apresentam riscos elevados relacionados ao roubo de cargas e à exposição do entregador, exigindo mudanças operacionais, redução do volume transportado e, em alguns casos, o uso de alternativas como entregas em pontos comerciais ou armários localizados em áreas consideradas mais seguras. Entretanto, a literatura também evidencia um ponto crítico, certas soluções adotadas para mitigar risco podem criar contradições com a sustentabilidade ambiental, como ocorre quando se utilizam veículos particulares antigos e movidos a combustíveis fósseis em áreas de risco, o que pode aumentar as emissões e comprometer objetivos de descarbonização.

Dessa forma, a literatura reforça que os desafios da logística de última milha na RMSP não devem ser compreendidos de maneira isolada, mas como um sistema de restrições simultâneas que afeta os pilares econômico, social e ambiental. De forma geral, observa-se que tais barreiras por meio de estratégias combinadas, como centros de distribuição para consolidação de cargas, roteirização adaptada às regras de circulação, uso de armários inteligentes e pontos de coleta, além da introdução de veículos elétricos em parte da frota, evidenciando um movimento organizacional voltado à eficiência operacional e à adequação a um cenário de baixa emissão.

7.3. Estabelecendo cenários de melhorias e seus indicadores KPIs

A partir dos desafios para uma logística mais sustentável identificados na seção anterior, cenários de melhoria apresentados a seguir são elaborados para a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). Cada cenário visa abordar pelo menos um dos desafios principais e, por conseguinte, apresentar impactos distintos nos indicadores TBL de sustentabilidade, sempre focando na fase operacional e desconsiderando os custos de implementação inicial.

Cenário #0 – Cenário Atual (Baseline)

Este cenário representa a operação logística de última milha atualmente praticada na RMSP, com todas as suas características e ineficiências inerentes. Ele serve como ponto de comparação para os demais cenários propostos. Reflete os valores de consumo de combustível, custo total operacional e número de empregos conforme a realidade operacional vigente das entregas de bens e produtos na região metropolitana. Busca-se considerar as falhas de entrega, o tráfego urbano, as zonas de restrição e os desafios de segurança que são característicos das grandes metrópoles brasileiras e latino-americanas, conforme discutido em Giuffrida *et al.* (2022).

Conforme apresentado na seção de metodologia, dados para os KPIs do baseline não estão disponíveis até o momento, por isso um valor de 100 é aqui assumido; 100R\$/ano de custo operacional; 100kgCO₂/ano de emissão direta; 100funcionarios/ano. Importante destacar que, como as discussões são feitas de forma comparativa entre os cenários, essa abordagem metodológica é consistente, pois dados relativos são calculados e discutidos para atingir os objetivos do estudo.

Cenário #1 – Expansão Massiva de Pontos de Coleta e Armários Inteligentes (Resposta ao desafio da Ausência do Destinatário)

Este cenário foca na estratégia de mitigar o problema da ausência do destinatário, que é uma das causas mais significativas de falhas e ineficiência na logística de última milha (Giuffrida *et al.*, 2022). Figura 8, propõe-se a expansão

estratégica de uma, rede de armários inteligentes *smart lockers*, Figura 9 pontos de coleta, em toda a RMSP.

Figura 8 - Exemplo de smart lockers¹



Figura 9 - Ponto de coleta (PUDO - pickup, drop off)²



A implementação de uma rede capilarizada e densa de pontos de coleta e *smart lockers* em locais de fácil acesso para os consumidores visa centralizar a entrega de múltiplos pacotes. Como sugerido por Alves et al. (2022), esta abordagem elimina a necessidade do entregador encontrar o destinatário em casa, o que reduz significativamente o insucesso na primeira tentativa de entrega. A roteirização de entregas é, então, otimizada para a distribuição nesses pontos centrais, diminuindo a quilometragem total percorrida e as reentregas. Soluções como centro de distribuição e processamento (CDPs) e área de distribuição e processamento (ADPs) são reconhecidas na literatura (Oliveira et al., 2019; Sawik, 2024) como alternativas importantes para a entrega em casa, por reduzirem falhas e o tempo de entrega.

¹ https://commons.wikimedia.org/wiki/File:DmBOX,_Allee,_Budapest.jpg

² https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Avito_pickup_point_2023.jpg

Para este cenário, os impactos nos indicadores operacionais estimados com base na revisão da literatura e tendo como referência valores do cenário baseline seriam:

- Consumo de combustível (L/ano): Redução operacional estimada entre 13% e 32%. A diminuição das reentregas e a otimização de rotas para pontos de coleta fixos resultam em menor quilometragem percorrida por veículo. Estudos como o de Pinchasik; Hovi; Dong (2025) apontam reduções significativas no consumo de combustível, com simulações sobre a adoção de CDPs e o reuso de quiosques como pontos de coleta indicando expressiva redução na distância percorrida e nas emissões de CO₂.
- Número de empregos (unidades/ano): A consolidação de entregas em pontos de retirada reduz substancialmente a carga de trabalho associada às entregas B2C. A literatura indica que *lockers* eliminam deslocamentos porta-a-porta, diminuem o tempo de parada e praticamente eliminam falhas de entrega. Em estudo de campo, Ranjbari et al. (2023) mostraram que a adoção de armários inteligentes para encomendas reduz o tempo de permanência do entregador dentro dos edifícios em 50–60% e o tempo de parada do veículo durante as operações de entrega em 33%, impactando diretamente o esforço operacional dos motoristas. Gevaers et al. (2014), por sua vez, evidenciaram que pontos de coleta elevam o fator de carga, reduzem quilômetros improdutivos por pacote e eliminam entregas malsucedidas (*not-at-home*). A convergência dessas evidências sustenta a estimativa de aumento 30% e 40% na demanda de mão de obra.
- Custo Total Operacional (R\$/ano): Redução operacional estimada entre 3% e 7%. A eliminação de reentregas, a otimização de rotas e o aumento da taxa de sucesso na primeira entrega geram uma economia operacional significativa, compensando eventuais custos contínuos de manutenção da rede. O insucesso da entrega é uma causa primária de ineficiência e aumento de custos (Pinchasik; Hovi; Dong, 2025).

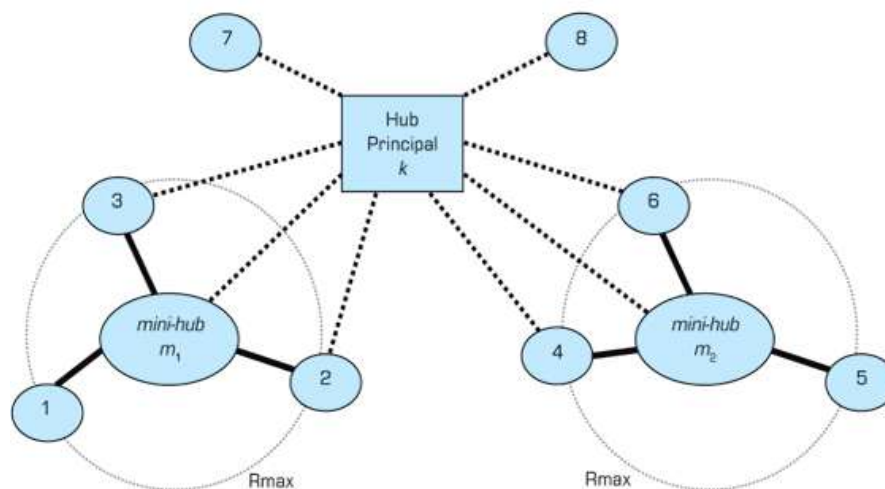
Cenário #2 – Implementação de Centros de Consolidação de Carga (FCCs) (Resposta ao desafio do Tráfego Urbano)

Este cenário propõe a criação e operação de Centros de Consolidação de Carga (FCCs), também conhecidos como Centros de Consolidação Urbana (CCUs) Figura 10, localizados estrategicamente nas periferias da RMSP. O objetivo é mitigar os

impactos do tráfego urbano, como congestionamentos, poluição e ruído, que são desafios persistentes em grandes metrópoles (Giuffrida *et al.*, 2022).

Grandes veículos de carga realizam o transporte de mercadorias até os FCCs, nesses centros, a carga é consolidada e, posteriormente, redistribuída para veículos menores, mais ágeis e que não usam ou reduzem o uso de diesel (como furgões elétricos, bicicletas de carga, ou veículos de menor porte) para a entrega final dentro das áreas urbanas mais densas. Essa abordagem reduz significativamente o número de grandes veículos circulando em áreas congestionadas, contribuindo para a fluidez do trânsito e a diminuição da poluição sonora e do ar. Conforme discutido por Ceccato; Gastaldi (2023), mini-hubs e CCUs são reconhecidos como pontos de transbordo eficazes, por exemplo, para bicicletas de carga.

Figura 10 - Esquema hub principal e mini-hubs como proposta de centro de consolidação urbana (CCUs).



Fonte: Alamo; Brinati; (2006)

Para este cenário, os impactos nos indicadores operacionais estimados com base na revisão da literatura e tendo como referência valores do cenário baseline seriam:

- Consumo de combustível (L/ano): Redução operacional estimada entre 11% e 21%. A consolidação de cargas e o uso de veículos menores e mais eficientes na última milha resultam em menor consumo de combustíveis fósseis em áreas urbanas. O uso de veículos mais leves e eficientes nas rotas finais mitiga o impacto do transporte em áreas densamente povoadas (Dreischerf; Buijs, 2022).

- Número de empregos (unidades/ano): Embora frequentemente promovidos como instrumentos de eficiência urbana, os UCCs introduzem etapas adicionais de duplo manuseio, exigindo mais processamento, separação, fracionamento e movimentação de carga. Allen *et al.* (2012) destacaram que os UCCs envolvem atividades adicionais de manuseio e geram custos extras com pessoal e transbordo, resultando em aumento de custos entre 15% e 25%. Além disso, Llorca e Moeckel (2021) indicaram que, quando a distribuição final é realizada por bicicletas de carga a partir de microhubs, apenas 10% das vans podem ser substituídas sem perda de eficiência. Acima desse limite, são necessárias mais bicicletas, mais condutores e maior tempo operacional, elevando diretamente o custo de mão de obra. Assim, UCCs e microhubs tendem a exigir de 15% a 30% mais pessoal para manter o mesmo nível de processamento.
- Custo Total Operacional (R\$/ano): Aumento operacional estimado entre 2% e 24%. Embora a gestão dos FCCs e a operação da frota secundária representem um custo operacional, esse aumento é parcialmente compensado pela otimização da frota primária, redução de custos relacionados a congestionamentos e multas, e maior eficiência nas entregas (Dreischerf; Buijs, 2022). A literatura aponta que a viabilidade financeira de UCCs pode ser desafiadora, tendendo ao fracasso sem alto volume de carga ou subsídios (Van Heeswijk *et al.*, 2019; Orhan *et al.*, 2024), o que justifica um aumento no custo operacional neste cenário.

Cenário #3 – Eletrificação Parcial da Frota de Última Milha (Resposta ao desafio das Zonas de Restrição e Rodízio)

Este cenário aborda as restrições de circulação veicular, como rodízios e zonas de baixa emissão (LEZ), que impactam a eficiência e o custo da logística de última milha em centros urbanos. A proposta é a substituição de uma parcela significativa da frota de veículos de entrega por modelos elétricos (EVs).

Neste cenário, uma parte da frota operacional (% dos furgões e veículos leves) é convertida para veículos elétricos. Esta transição permite a circulação sem as restrições impostas a veículos a combustão, como rodízios ou acesso limitado a zonas de baixa emissão (Ahani *et al.*, 2023; Malafaia; Ribeiro; Fontes, 2024). Consequentemente, otimiza-se o planejamento de rotas e o tempo de entrega, além de reduzir as emissões diretas de poluentes atmosféricos e de ruído. Os EVs tornam-

se mais competitivos em termos de custo total ao considerar as restrições de LEZ (Bruglieri *et al.*, 2025; Skultéty; Beňová; Gnap, 2021).

Para este cenário, os impactos nos indicadores operacionais estimados com base na revisão da literatura e tendo como referência valores do cenário baseline seriam:

- Consumo de combustível (L/ano): Estima-se uma redução substancial entre 15% e 48% nas emissões, em relação à frota convertida. Os veículos elétricos não utilizam combustíveis fósseis de forma direta e, em alguns contextos, tampouco de forma indireta, como no caso brasileiro, em que a eletricidade é majoritariamente gerada por usinas hidrelétricas, o que resulta em diminuição direta das emissões de CO₂ por quilômetro rodado (Alves *et al.*, 2022; Lal *et al.*, 2023). Embora haja consumo de energia elétrica, o impacto ambiental direto da operação veicular permanece reduzido.
- Número de empregos (unidades/ano): A eletrificação da frota não altera a relação estrutural entre motoristas e veículos, mantendo praticamente inalterada a quantidade de trabalhadores necessária para executar as rotas. Lebeau *et al.* (2015) mostram que a transição tecnológica impacta custos, manutenção e incentivos econômicos, mas não afeta a necessidade de motoristas. No entanto, Taefi *et al.* (2014) evidenciam que limitações de autonomia, maior consumo energético no inverno (30–60%) e a necessidade de recargas intermediárias podem reduzir a flexibilidade operacional e exigir pequena ampliação da frota para manter o nível de serviço, produzindo aumentos marginais de 2–5%. Assim, o impacto da eletrificação sobre a mão de obra permanece entre 0% e +5%, variando conforme o perfil geográfico e a extensão das rotas.
- Custo Total Operacional (R\$/ano): Pequena redução operacional estimado entre -10% e 17%. Embora os custos de aquisição de EVs sejam mais altos (e desconsiderados nesta análise operacional), os custos operacionais de "combustível" (eletricidade) e manutenção tendem a ser menores a longo prazo. Além disso, a capacidade de operar sem restrições em áreas específicas pode gerar economia de tempo e evitar multas (Pyra *et al.*, 2025).

Cenário #4 – Rotas Otimizadas e Pontos de Entrega Seguros (Resposta ao desafio da Segurança)

Este cenário concentra-se em estratégias para mitigar os riscos de segurança, como roubos e furtos de carga, que representam um desafio persistente e com alto impacto operacional e financeiro na logística de última milha, especialmente em regiões urbanas de mercados emergentes (Queiroz *et al.*, 2025; Silva; Sampaio, 2023).

Nesse cenário tem-se a implementação de sistemas avançados de roteirização que, além da eficiência, consideram a minimização da exposição a áreas de alto risco. Isso é complementado pelo uso de pontos de entrega seguros (como *lockers* e pontos de coleta em estabelecimentos comerciais locais), especialmente em regiões onde a segurança é uma preocupação. Em áreas de maior vulnerabilidade, são estabelecidas parcerias operacionais com membros da comunidade local ou pequenos transportadores autônomos para realizar a entrega final. Embora essa estratégia possa, em alguns casos, envolver veículos menos eficientes do ponto de vista ambiental (como veículos particulares mais antigos, que consomem mais combustível e emitem mais), o benefício da segurança da carga e do entregador e a garantia da entrega poderiam superar esse *trade-off* operacional imediato. A redução do risco de perdas de carga impacta diretamente os custos logísticos.

Para este cenário, os impactos nos indicadores operacionais estimados com base na revisão da literatura e tendo como referência valores do cenário baseline seriam:

- Consumo de combustível (L/ano): Variação operacional de 15% a 30%. A otimização de rotas pode gerar alguma redução de quilometragem. No entanto, o uso de veículos parceiros locais, que podem não ser os mais eficientes em termos de consumo, em áreas específicas, pode anular parte dessa economia ou até resultar em um leve aumento no consumo geral de combustível da operação (Sarioguz, 2025).
- Número de empregos (unidades/ano): Redução operacional estimado entre 10% e 20%. A criação e gestão de uma rede de parceiros locais e a operação de pontos de entrega seguros em comunidades podem gerar novos postos de trabalho ou oportunidades de renda para a população local, fortalecendo o pilar social da sustentabilidade (Boysen; Fedtke; Schwerdfeger, 2021).

- **Custo Total Operacional (R\$/ano):** Redução operacional estimada entre 10% e 20%. Soluções avançadas de roteirização reduzem distâncias ociosas, otimizam sequências de paradas e diminuem o tempo total de direção necessária para o mesmo volume de entregas. Bosona e Gebresenbet (2011) demonstram reduções expressivas de 88% em distância e tempo e 48% no número de rotas em cenários otimizados – valores que, embora específicos ao caso estudado, comprovam o potencial substancial da otimização computacional. Em um cenário ainda mais avançado, registram reduções de 93% (distância), 91% (tempo) e 87% (rotas).

A Tabela 6 apresenta a visão geral dos indicadores do TBL para cada um dos cenários avaliados, que servem como base para o cálculo do índice de sustentabilidade relativo (S) composto e permitem discussões comparativas de forma relativa e a identificação das estratégias mais sustentáveis.

Tabela 6 - Indicadores ambiental, social e econômico dos quatro cenários avaliados

Indicador	Cenários				
	#0 Baseline	#1 PUDO, smart lockers	#2 FCCs	#3 Eletrificação	#4 Segurança, rotas
Consumo de combustível (L/ano)	100	- 13% a -32%	- 11% a 21%	- 15% a - 48%	- 15% a -30%
Número de empregos (unidade/ano)	100	+ 30% a 40%	+ 15% a 30%	+ 0% a 5%	- 10% a -20%
Custo total operacional (R\$/ano)	100	- 3% a 7%	+ 2% a 24%	- 10% a - 17%	- 10% a -20%

Fonte: autor (2026)

7.4. Indicadores de sustentabilidade

Com a descrição dos 4 cenários mais o baseline, seus valores relativos de KPIs e o peso de influência dos 3 capitais obtidos no AHP, pode-se calcular o índice relativo de sustentabilidade (S). Para isso, a análise de Monte Carlo foi considerada para considerar todas as possibilidades possíveis do valor de S de acordo com as faixas de variação percentual conforme identificado na descrição dos cenários da seção anterior.

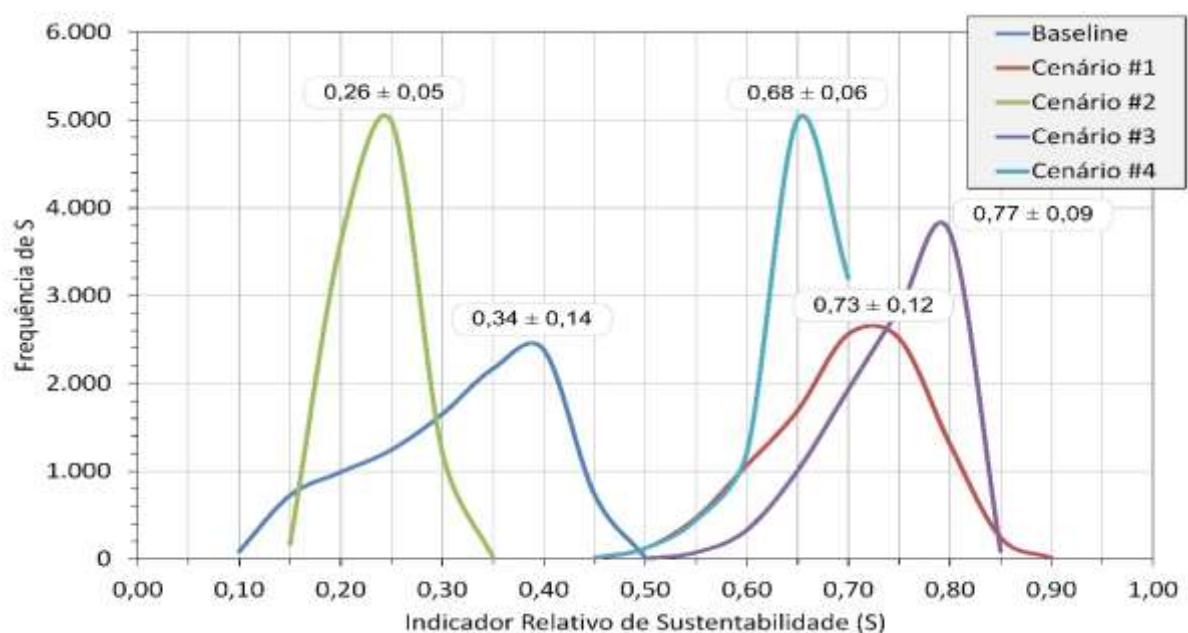
Conforme a Figura 11, a distribuição da frequência simulada do Índice Relativo de Sustentabilidade (S) para o cenário baseline e os cenários 1 a 4 revela o comportamento probabilístico de cada alternativa. Pode-se observar a diferenciação entre os regimes de desempenho, evidenciando variações no nível médio e na dispersão dos índices entre as alternativas avaliadas. Esta dispersão indica que, além da média de desempenho, a estabilidade de cada cenário varia conforme a sensibilidade dos indicadores aos pesos atribuídos pelo AHP. Os cenários que apresentam curvas de frequência mais deslocadas à direita indicam maior probabilidade de atingir níveis superiores de sustentabilidade, enquanto curvas mais "achatadas" (maior curtose) sugerem uma maior incerteza e variabilidade nos resultados.

Além da análise apresentada no Figura 11, as distribuições de frequência individuais e os histogramas detalhados para o cenário baseline e para cada um dos quatro cenários propostos encontram-se documentados no Apêndice D, essa visualização suplementar permite identificar com maior precisão a curtose e a assimetria de cada distribuição simulada, fundamentando a estabilidade estatística discutida nesta seção.

Figura 11 - Distribuição da frequência simulada do Índice Relativo de Sustentabilidade (S) para o baseline e os cenários 1 a 4.

Fonte: Elaboração própria. Dados brutos disponíveis no Apêndice C.

Para complementar a interpretação visual apresentada no Figura 11, a Tabela



7 sintetiza as principais estatísticas descritivas obtidas por meio da simulação de

Monte Carlo para o Índice Relativo de Sustentabilidade (S), incluindo medidas de tendência central (média e mediana), dispersão (desvio padrão), intervalo de confiança de 95% e a síntese probabilística do desempenho final de cada cenário.

Tabela 7 - Estatísticas descritivas do Índice Relativo de Sustentabilidade (S) dos cenários simulados

Cenário	Média	Mediana	Desvio Padrão	IC 95%	S Final
Baseline	0,34	0,35	0,07	0,14	0,34 ± 0,14
Cenário # 1	0,72	0,73	0,05	0,12	0,72 ± 0,12
Cenário # 2	0,26	0,26	0,02	0,05	0,26 ± 0,05
Cenário # 3	0,76	0,78	0,04	0,09	0,76 ± 0,09
Cenário # 4	0,67	0,68	0,03	0,06	0,67 ± 0,06

Fonte: Elaboração própria. Dados brutos disponíveis no Apêndice D

Os resultados obtidos por meio da simulação de Monte Carlo, com 10.000 iterações, para o índice relativo de sustentabilidade definido no intervalo de 0 a 1, em que valores mais elevados indicam maior sustentabilidade evidenciam diferenças expressivas entre os sistemas avaliados (Baseline e quatro cenários). Essas diferenças se manifestam tanto nas medidas de tendência central, representadas pela média e pela mediana, quanto nas medidas de dispersão, expressas pelo desvio padrão e pela amplitude do intervalo de confiança de 95%. Em conjunto, tais resultados permitem afirmar que os cenários não diferem apenas em seu valor médio do índice relativo de sustentabilidade comparativa, mas também no grau de estabilidade probabilística associado a cada configuração analisada.

No Baseline, observa-se a predominância de valores do índice relativo de sustentabilidade em faixas comparativas intermediárias baixas, com concentração aproximada entre 0,25 e 0,45. As estatísticas descritivas indicam média igual a 0,34 e mediana de 0,35, revelando um desempenho comparativo típico moderado, porém ainda distante de patamares com maior do índice relativo de sustentabilidade comparativa. O desvio padrão de 0,07 indica variabilidade relativamente elevada, sugerindo oscilações relevantes em torno desse nível de desempenho. A síntese probabilística pode ser representada como S final = 0,34 ± 0,14 (intervalo de confiança

de 95%), o que indica que, mesmo considerando a incerteza, o sistema tende a permanecer em um patamar intermediário inferior de sustentabilidade comparativa.

O Cenário 1 apresenta melhora substancial em relação ao Baseline, com deslocamento da distribuição para valores significativamente superior. A média de 0,72 e a mediana de 0,73 indicam ganho expressivo e consistente no desempenho sustentável comparativo. O desvio padrão de 0,05, inferior ao do Baseline, sugere maior estabilidade relativa dos resultados. A síntese probabilística, expressa como $S_{\text{final}} = 0,72 \pm 0,12$ (95%), reforça que o sistema se mantém em um regime de maior sustentabilidade comparativa. Assim, esse cenário representa uma melhora quantitativa relevante e uma mudança estrutural no regime de desempenho.

O Cenário 2 apresenta o menor nível de sustentabilidade comparativa entre todos os sistemas analisados. A distribuição dos valores de S encontra-se fortemente concentrada na faixa de 0,24 a 0,28, o que é confirmado pela média de 0,26 e pela mediana de 0,26. O desvio padrão de 0,02 é um dos menores entre todos os cenários, indicando baixa variabilidade e elevada consistência, porém em um patamar reduzido de sustentabilidade comparativa. A síntese probabilística $S_{\text{final}} = 0,26 \pm 0,05$ (95%) evidencia que o sistema permanece praticamente restrito a essa faixa, com baixa probabilidade de atingir níveis mais elevados. Trata-se, portanto, de um cenário estruturalmente estável, mas pouco sustentável comparativamente.

O Cenário 3 representa a alternativa de maior sustentabilidade comparativa média entre os sistemas avaliados, com deslocamento da distribuição para valores elevados do índice S, predominantemente entre 0,72 e 0,82, as estatísticas descritivas indicam média de 0,76 e mediana de 0,78, revelando desempenho elevado e consistente. O desvio padrão de 0,04 indica variabilidade moderada, compatível com sistemas de alto desempenho. A síntese probabilística $S_{\text{final}} = 0,76 \pm 0,09$ (95%) indica que, mesmo sob condições de incerteza, o sistema permanece amplamente em patamares elevados de sustentabilidade comparativa. Desse modo, o Cenário 3 caracteriza-se como a alternativa com o melhor nível de sustentabilidade comparativa, com bom equilíbrio entre desempenho e estabilidade.

Por fim, o Cenário 4 apresenta desempenho também elevado, mantendo-se entre os melhores sistemas avaliados. A distribuição dos valores de S encontra-se concentrada em faixas altas, principalmente entre 0,64 e 0,72, com recorrência de valores próximos ao limite superior dessa faixa. As estatísticas indicam média de 0,67 e mediana de 0,68, evidenciando um nível de sustentabilidade comparativo elevado.

O desvio padrão de 0,03 demonstra que, além do alto desempenho, o cenário apresenta excelente estabilidade probabilística. A síntese probabilística $S_{\text{final}} = 0,67 \pm 0,06$ (95%) confirma que o sistema se mantém em faixas superiores mesmo diante das incertezas simuladas, caracterizando-se como uma alternativa robusta e sustentável comparativamente dentre as avaliadas.

A comparação conjunta dos resultados permite identificar diferenças claras entre os cenários, tanto em termos de patamar médio de sustentabilidade comparativo quanto de dispersão dos resultados. O primeiro aspecto relevante refere-se ao fato de que Cenário 3, Cenário 1 e Cenário 4 se destacam amplamente em relação aos demais, pois apresentam médias substancialmente superiores ao Baseline e ao cenário de menor desempenho, o que os posiciona em um regime de maior sustentabilidade comparativa.

Entre esses três, o Cenário 3 ocupa a primeira posição, pois combina a maior média (0,76) e a maior mediana (0,78) com desvio padrão moderado, indicando desempenho superior e, ao mesmo tempo, elevada robustez. O Cenário 1, embora apresente resultados ligeiramente inferiores, também indica maior sustentabilidade comparativa e estabilidade, consolidando-se como a segunda melhor alternativa. O Cenário 4, por sua vez, ocupa a terceira posição, apresentando média de 0,67 e o menor desvio padrão entre os cenários superiores, o que reforça sua previsibilidade.

Em um nível intermediário, situa-se o Baseline, com média de 0,34, representando a condição de referência do sistema. Ainda que apresente desempenho superior ao Cenário 2, permanece distante do desempenho observado nos Cenários 1, 3 e 4. Na extremidade inferior encontra-se o Cenário 2, que, embora seja um dos mais estáveis do ponto de vista estatístico, apresenta o menor desempenho médio entre todos os sistemas. Esse resultado é particularmente relevante porque indica que baixa dispersão não implica, necessariamente, em maior sustentabilidade comparativa. Em outras palavras, o Cenário 2 apresenta elevada consistência, mas essa consistência ocorre em torno de um nível baixo de desempenho, o que limita sua atratividade do ponto de vista decisório.

Assim, considerando conjuntamente média, mediana, desvio padrão e intervalo de confiança, o ranqueamento final dos cenários em termos de sustentabilidade comparativa é o seguinte: Cenário 3 em primeiro lugar, Cenário 1 em segundo, Cenário 4 em terceiro, Baseline em quarto e Cenário 2 em quinto. Esse ordenamento indica que os cenários mais sustentáveis comparativamente, não são apenas aqueles

que apresentam maiores valores centrais do índice (S), mas também aqueles capazes de manter tais resultados com menor variabilidade sob condições de incerteza.

Os resultados permitem identificar três regimes distintos de sustentabilidade comparativa, o primeiro corresponde ao regime de baixa sustentabilidade, representado pelo Cenário 2, com média de 0,26 e baixa dispersão. O segundo corresponde ao regime intermediário, representado pelo Baseline, com média de 0,34. O terceiro corresponde ao regime de alta sustentabilidade, representado pelos Cenários 4, 1 e 3, destacando-se o Cenário 3 como a configuração mais favorável.

Dessa forma, a análise evidencia que melhorias expressivas no índice relativo de sustentabilidade dependem de transformações mais abrangentes no sistema logístico, uma vez que mudanças incrementais tendem apenas a elevar marginalmente o desempenho, sem alterar substancialmente o regime probabilístico de sustentabilidade.

Sob uma perspectiva prática, os resultados sugerem que intervenções estruturais na logística de última milha possuem maior capacidade de alterar substancialmente o desempenho do índice relativo de sustentabilidade quando comparadas a melhorias incrementais. Estratégias associadas à eletrificação parcial da frota, expansão de pontos de coleta e armários inteligentes, bem como à otimização operacional baseada em roteirização e segurança logística, indicam maior potencial de transformação do sistema de entregas urbanas da RMSP. Em contrapartida, soluções dependentes de elevada infraestrutura intermediária, como centros de consolidação de carga, apresentaram limitações associadas à viabilidade operacional e econômica no contexto analisado.

Assim, os achados desta pesquisa indicam que a promoção da sustentabilidade na logística urbana não depende exclusivamente de decisões empresariais isoladas, mas também da formulação de políticas públicas coordenadas capazes de alinhar eficiência econômica, redução de impactos ambientais e melhoria das condições operacionais do sistema logístico urbano, particularmente em regiões metropolitanas complexas como São Paulo.

7.5 Análise de sensibilidade sob diferentes perfis de ponderação

Pode se observar na Tabela 8 com dados do Apêndice E que no perfil equilibrado, observou-se desempenho superior do Cenário 1 (Expansão Massiva de Pontos de Coleta e Armários Inteligentes), que apresentou média do índice relativo de sustentabilidade igual a 0,77, seguido pelo Cenário 3 (Eletrificação Parcial da Frota), com valor médio de 0,73. Esses resultados indicam que ambas as estratégias apresentam elevada capacidade de promover ganhos simultâneos nas dimensões econômica, social e ambiental da sustentabilidade. O Cenário 4 (Rotas Otimizadas e Pontos de Entrega Seguros) apresentou desempenho intermediário (0,56), enquanto o Cenário 2 (Centros de Consolidação de Carga) apresentou ganhos mais moderados (0,42). O cenário Baseline, representando a condição atual da logística de última milha na RMSP, apresentou o menor desempenho (0,24), evidenciando limitações significativas sob uma perspectiva integrada de sustentabilidade.

Tabela 8 - Resultados do Índice Relativo de Sustentabilidade (S) dos Cenários sob Diferentes Perfis de Ponderação

Perfil	Cenários				
	#1	#2	#3	#4	Baseline
Equilibrado	0,77	0,42	0,73	0,56	0,24
Social	0,84	0,49	0,61	0,40	0,29
Ambiental	0,74	0,43	0,81	0,63	0,17
Econômico	0,73	0,26	0,77	0,68	0,34

Fonte: Autor com dados do Apêndice E

Quando atribuída maior relevância à dimensão social, no denominado perfil socialmente orientado, o Cenário 1 apresentou desempenho ainda mais expressivo (0,84), consolidando-se como a alternativa de maior sustentabilidade relativa sob essa perspectiva. Esse resultado sugere que a expansão de pontos de coleta e armários inteligentes possui forte potencial de contribuição para melhorias sociais, especialmente relacionadas à reorganização das operações logísticas, redução de tentativas malsucedidas de entrega e geração de novas atividades operacionais associadas à infraestrutura de retirada. O Cenário 3 apresentou desempenho intermediário (0,61), seguido do Cenário 2 (0,49) e do Cenário 4 (0,40). O cenário baseline permaneceu com desempenho reduzido (0,29), reforçando as limitações estruturais do modelo atual de entregas urbanas.

No perfil ambientalmente orientado, caracterizado pela predominância dos indicadores relacionados às emissões e ao desempenho energético, o Cenário 3 (Eletrificação Parcial da Frota) destacou-se como a alternativa de maior sustentabilidade relativa, atingindo média de 0,81. Esse resultado evidencia a elevada contribuição da substituição parcial de veículos convencionais por alternativas eletrificadas na mitigação dos impactos ambientais da logística urbana, sobretudo no que se refere à redução das emissões de dióxido de carbono (CO₂). O Cenário 1 manteve desempenho elevado (0,74), indicando que a diminuição das falhas de entrega e dos deslocamentos redundantes também produz benefícios ambientais relevantes. O Cenário 4 apresentou desempenho intermediário (0,63), enquanto o Cenário 2 registrou resultado moderado (0,43). O Baseline, novamente, apresentou o menor índice (0,17), indicando reduzido desempenho ambiental da operação atual.

No perfil economicamente orientado, em que os custos operacionais assumem maior peso relativo, o Cenário 3 apresentou o melhor desempenho (0,77), seguido do Cenário 1 (0,73) e do Cenário 4 (0,68). Os resultados sugerem que a eletrificação parcial da frota e a implementação de armários inteligentes podem proporcionar ganhos econômicos relevantes no médio e longo prazo, especialmente devido à redução de custos associados a falhas operacionais, reentregas e maior eficiência logística. Em contrapartida, o Cenário 2 apresentou desempenho inferior ao próprio Baseline (0,26 contra 0,34), sugerindo que os custos adicionais relacionados à consolidação urbana, como transbordo e manuseio intermediário, podem comprometer sua atratividade econômica no curto prazo.

De forma geral, a análise de sensibilidade evidencia que os resultados do índice relativo de sustentabilidade apresentam consistência e robustez frente à variação dos pesos dos critérios, indicando estabilidade metodológica do modelo proposto. Observa-se que o Cenário 1 e o Cenário 3 mantêm desempenho superior do índice relativo de sustentabilidade (S) independentemente da estrutura de ponderação adotada, ainda que alternem posições conforme o perfil decisório considerado.

O Cenário 1 indicou possuir maior aderência às perspectivas sociais e integradas de sustentabilidade, enquanto o Cenário 3 apresentou superioridade sob os enfoques econômico e ambiental. O Cenário 4 mantém comportamento intermediário e relativamente estável, enquanto o Cenário 2 apresenta maior sensibilidade às alterações nos pesos, evidenciando dependência mais acentuada do contexto de avaliação.

Esses resultados reforçam a validade do modelo de avaliação proposto, indicando que o desempenho relativo dos cenários não depende exclusivamente de uma única configuração de pesos oriunda do método AHP, mas permanece consistente mesmo diante de diferentes perspectivas de decisão, fortalecendo a confiabilidade analítica da avaliação de sustentabilidade aplicada à logística de última milha na RMSP

7.6 Comparação dos resultados da pesquisa em comparação ao contexto internacional

Os resultados obtidos na modelagem dos cenários de sustentabilidade da Logística de Última Milha na Região Metropolitana de São Paulo evidenciam convergências importantes com a literatura internacional, mas também revelam diferenças estruturais que alteram significativamente a interpretação da viabilidade das soluções logísticas quando analisadas em contextos urbanos de países emergentes. Embora muitas das estratégias propostas internacionalmente indiquem potencial de melhoria operacional e ambiental, sua efetividade depende das especificidades territoriais, econômicas e institucionais de cada região.

Nesse sentido, os resultados desta pesquisa mostram que fatores como insegurança urbana, desigualdade socioespacial, restrições regulatórias redefinem os determinantes da sustentabilidade logística no contexto brasileiro.

Cenário 1: Expansão de Armários Inteligentes e Pontos de Coleta — Entre a Eficiência Operacional e a Inclusão Territorial

A expansão dos armários inteligentes e pontos de coleta apresentou elevada viabilidade e sustentabilidade relativa, configurando-se como o segundo melhor desempenho entre os cenários simulados. O principal benefício observado concentra-se na mitigação das falhas na primeira tentativa de entrega decorrentes da ausência do destinatário, reduzindo deslocamentos improdutivos e aumentando a eficiência operacional das rotas.

Tal resultado converge com a literatura internacional, que reconhece amplamente o potencial dessas estruturas para consolidar entregas, reduzir quilometragem percorrida e minimizar emissões associadas às reentregas (Kahr, 2022; Ozyavas *et al.*, 2025). Zhang e Demir (2025), por exemplo, destacam que os

armários inteligentes representam uma inovação relevante para o armazenamento e retirada segura de encomendas, especialmente em centros urbanos densamente povoados.

Entretanto, os resultados obtidos nesta pesquisa indicam uma diferença substancial em relação aos fatores que justificam sua implementação. Em economias desenvolvidas, a expansão dessas soluções costuma ser impulsionada predominantemente pela conveniência do consumidor, associada à flexibilidade de horários, privacidade e facilidade de acesso (Tsai; Ngo; Che, 2024; Ma *et al.*, 2022). No contexto da Região Metropolitana de São Paulo, contudo, os resultados indicam que os armários inteligentes e pontos de coleta assumem uma função estrutural mais ampla, relacionada à superação de barreiras territoriais e de segurança. Em áreas periféricas e regiões classificadas como de alto risco operacional, tais estruturas deixam de representar apenas um mecanismo de conveniência e passam a constituir uma infraestrutura essencial para viabilizar entregas. A presença de restrições territoriais, dificuldades de acesso e elevados índices de criminalidade faz com que esses pontos funcionem como mecanismos de inclusão logística e socioespacial, permitindo ampliar o alcance das operações e reduzir falhas decorrentes de limitações territoriais. Essa interpretação encontra respaldo em estudos realizados em países em desenvolvimento, os quais destacam os impactos da insegurança pública sobre a distribuição urbana de mercadorias (Matinha; Andrade; Campos, 2023).

Sob essa perspectiva, observa-se uma limitação relevante na literatura internacional, frequentemente centrada em modelos de aceitação tecnológica voltados ao comportamento do consumidor. Ainda não são frequentes os estudos que incorporam vulnerabilidade social, risco territorial e violência urbana como variáveis determinantes no planejamento da rede logística, especialmente em contextos metropolitanos marcados por forte desigualdade socioespacial.

Cenário 2: Centros de Consolidação Urbana — Benefícios Operacionais e Limitações de Viabilidade Econômica

Embora a literatura internacional frequentemente apresente os Centros de Consolidação Urbana como soluções promissoras para mitigação do congestionamento e redução das emissões urbanas, os resultados desta pesquisa indicam limitações importantes quanto à sua sustentabilidade relativa no contexto metropolitano brasileiro.

O cenário apresentou o menor desempenho relativo de sustentabilidade entre os modelos avaliados, evidenciando um padrão estrutural caracterizado por elevado custo operacional e baixa atratividade econômica. Esse resultado apresenta forte convergência com análises empíricas recentes, que vêm questionando o excessivo otimismo em torno dessa solução logística. Por exemplo, alguns estudos reconhecem o potencial desses centros para racionalizar fluxos urbanos e facilitar o uso de modais menos poluentes, mas também alertam para desafios financeiros persistentes relacionados à manutenção da operação (Ballano *et al.*, 2023; Golinska; Dawson; Sethanan, 2023).

Na RMSP, o elevado custo do terreno urbano, associado à necessidade de múltiplas movimentações das mercadorias entre centros intermediários e pontos finais de distribuição, impôs penalizações significativas ao desempenho econômico do cenário. O chamado duplo manuseio da carga aumentou custos operacionais e reduziu a competitividade da solução frente a modelos logísticos mais flexíveis.

Além disso, os resultados indicam que a viabilidade dos Centros de Consolidação Urbana depende fortemente da cooperação entre operadores logísticos, do compartilhamento de infraestrutura e de incentivos governamentais permanentes, fatores que representam barreiras para a consolidação dessas estruturas em mercados altamente fragmentados e competitivos, como o brasileiro.

Dessa forma, os achados neste estudo reforçam uma limitação metodológica recorrente na literatura internacional, a tendência de enfatizar ganhos ambientais e redução do tráfego sem incorporar integralmente os custos reais do terreno urbano, do transbordo de mercadorias e da complexidade operacional envolvida. Persistem lacunas no desenvolvimento de modelos que sejam compatíveis com realidades urbanas caracterizadas por intensa competição logística e elevada valorização imobiliária, como na RMSP.

Cenário 3: Eletrificação Parcial da Frota — Sustentabilidade Ambiental e Flexibilidade Operacional

A eletrificação parcial da frota apresentou o maior índice relativo de sustentabilidade entre os cenários analisados, indicando elevada capacidade de equilibrar ganhos ambientais, manutenção dos níveis de empregabilidade e melhoria da eficiência operacional. Os resultados mostram forte convergência com a literatura internacional, que aponta benefícios consistentes dos veículos elétricos na redução

das emissões de gases de efeito estufa e na diminuição dos custos operacionais ao longo do ciclo de vida dos ativos (Castillo; Álvarez, 2023; Goulianou; Regan; Goodchild, 2024).

Contudo, a principal contribuição desta pesquisa reside na identificação de uma motivação operacional distinta daquela observada em países desenvolvidos. Em grande parte dos estudos internacionais, especialmente no contexto europeu, a eletrificação da última milha é impulsionada prioritariamente pelo cumprimento de restrições ambientais e exigências legais associadas às zonas urbanas de baixa emissão (Giordano; Christidis, 2025; Ferreira; Esperança, 2025). Na Região Metropolitana de São Paulo, entretanto, a eletrificação assume também uma função estratégica de flexibilização operacional. Em razão das restrições de circulação impostas ao transporte urbano, veículos eletrificados podem operar com maior liberdade, ampliando janelas de entrega e reduzindo limitações regulatórias associadas ao rodízio municipal. Assim, a melhoria ambiental deixa de ser o único vetor de adoção e passa a coexistir com ganhos concretos de produtividade logística.

Identificou-se uma lacuna importante na literatura especializada, ainda fortemente concentrada em aspectos relacionados à autonomia das baterias, infraestrutura de recarga e substituição de frota. Poucos estudos consideram de maneira explícita os ganhos operacionais decorrentes da ampliação da liberdade de circulação e da flexibilização temporal proporcionadas pela eletrificação em grandes metrópoles.

Cenário 4: Roteirização Otimizada e Pontos de Entrega Seguros A Segurança como Restrição Estrutural

O cenário de roteirização otimizada associada ao estabelecimento de pontos seguros de entrega apresentou elevado desempenho relativo da sustentabilidade, indicando forte aderência às especificidades operacionais da Região Metropolitana de São Paulo. Os resultados evidenciam a capacidade dessa estratégia de equilibrar custos operacionais, distâncias percorridas e tempo de entrega, sem desconsiderar os riscos inerentes ao ambiente urbano.

Internacionalmente, a literatura sobre roteirização concentra-se majoritariamente na otimização de percursos, buscando reduzir distâncias, tempo de deslocamento e consumo energético (Pourmohammadreza; Jokar, 2024). Em geral, os modelos assumem condições urbanas relativamente homogêneas, nas quais todas

as vias são consideradas acessíveis e seguras ao longo do dia. Contudo, surge uma severa divergência aplicacional. Modelos europeus e asiáticos de roteirização pressupõem a normalidade do espaço urbano, onde qualquer via é acessível e segura a qualquer momento do dia (Ma et al., 2022). Na Região Metropolitana de São Paulo, o roubo de cargas e os altos índices de violência em comunidades periféricas forçam os operadores logísticos a sobrepor o capital de segurança à eficiência da rota.

Conforme a discussão do cenário proposto convergem com as evidências apresentadas por Matinha, Andrade e Campos (2023), onde o risco logístico obriga que as entregas na última milha sejam reestruturadas para utilizar parceiros locais ou bases descentralizadas seguras, mesmo que isso acarrete o uso de frotas mais antigas por autônomos e aumente indiretamente o consumo de combustível, evidenciando um *trade-off* estrutural entre a segurança patrimonial e a eficiência ecológica.

Os achados também evidenciam uma limitação da literatura internacional de otimização logística, ainda predominantemente baseada em pressupostos de normalidade espacial. Permanecem escassos modelos matemáticos capazes de incorporar criminalidade urbana, zonas de risco e restrições territoriais como variáveis explícitas na definição das rotas, especialmente em ambientes urbanos caracterizados por forte desigualdade socioespacial.

Em conjunto, os resultados indicam que a sustentabilidade da Logística de Última Milha na Região Metropolitana de São Paulo não pode ser interpretada exclusivamente a partir dos modelos predominantes desenvolvidos em economias consideradas mais avançadas. Embora haja convergências quanto aos benefícios de determinadas estratégias logísticas, os fatores que condicionam sua efetividade mostram-se substancialmente distintos no contexto brasileiro. A pesquisa evidencia que elementos como segurança pública, restrições territoriais, desigualdade socioespacial, valorização imobiliária e limitações regulatórias exercem influência decisiva sobre a sustentabilidade das operações.

Assim, uma importante contribuição do estudo reside na análise crítica de que soluções amplamente reconhecidas internacionalmente necessitam ser reinterpretadas e adaptadas às condições operacionais de países emergentes, sob pena de superestimar benefícios ou negligenciar restrições estruturais relevantes para a realidade logística urbana brasileira.

8.Limitações de Pesquisa

Apesar das contribuições teóricas e aplicadas desta pesquisa para a avaliação da sustentabilidade relativa na Logística de Última Milha, alguns aspectos metodológicos e operacionais delimitam o escopo dos resultados obtidos e devem ser considerados na interpretação dos achados.

Primeiramente, o modelo proposto concentra-se predominantemente na análise dos impactos operacionais contínuos dos cenários logísticos, não incorporando, de forma detalhada, investimentos iniciais de implantação, custos de transição tecnológica e maturação das soluções propostas. Dessa forma, aspectos relacionados à viabilidade econômico-financeira de longo prazo, como custos de aquisição de infraestrutura, eletrificação da frota, implantação de armários inteligentes e adaptação de centros urbanos, não foram integralmente considerados, uma vez que o foco do estudo reside no comportamento operacional dos cenários sob uma perspectiva comparativa de sustentabilidade.

Outra limitação refere-se ao uso de parâmetros intervalares fundamentados na literatura científica e em evidências empíricas para a construção dos cenários simulados. Embora essa abordagem permita incorporar incerteza e ampliar a robustez analítica por meio da simulação de Monte Carlo, parte das variações dos indicadores representa estimativas derivadas de estudos nacionais e internacionais, podendo existir diferenças entre os impactos simulados e aqueles observados em operações reais da Região Metropolitana de São Paulo, especialmente diante das especificidades territoriais, regulatórias e socioeconômicas locais.

Adicionalmente, a atribuição dos pesos de importância dos capitais econômico, ambiental e social baseou-se na percepção de especialistas do setor logístico, utilizando o método Analytic Hierarchy Process (AHP). Embora essa abordagem seja amplamente consolidada na literatura multicritério, os pesos obtidos refletem um recorte específico de julgamento especializado, podendo variar em contextos decisórios distintos, setores econômicos diferentes ou sob perspectivas institucionais alternativas. Ainda assim, a análise de sensibilidade realizada contribuiu para reduzir parcialmente essa limitação ao verificar a estabilidade relativa dos cenários sob diferentes perfis de ponderação.

Além disso, o estudo adota uma perspectiva agregada da RMSP, não incorporando diferenciações espaciais intraurbanas mais detalhadas, como heterogeneidades entre municípios, densidade logística regional, diferenças de infraestrutura viária, padrões territoriais de consumo ou níveis distintos de vulnerabilidade socioespacial. Em regiões metropolitanas complexas, esses fatores podem influenciar significativamente o desempenho de determinadas estratégias de logística de última milha.

Por fim, a simplificação inerente ao modelo, necessária para viabilizar a comparação estruturada entre cenários, implica a não incorporação de determinadas variáveis dinâmicas da operação logística urbana, como mudanças comportamentais dos consumidores ao longo do tempo, variações sazonais da demanda, alterações regulatórias futuras e possíveis avanços tecnológicos disruptivos. Embora tais fatores não invalidem os resultados encontrados, sua consideração poderá ampliar a precisão e aplicabilidade do modelo em estudos futuros.

9. Conclusões

A presente pesquisa contribui para o avanço das discussões sobre sustentabilidade na Logística de Última Milha ao indicar que a avaliação de soluções logísticas urbanas exige uma abordagem integrada, capaz de considerar simultaneamente os impactos econômicos, ambientais e sociais das operações. A aplicação do modelo proposto à Região Metropolitana de São Paulo permitiu evidenciar que diferentes estratégias logísticas apresentam desempenhos distintos quando analisadas sob uma perspectiva multicritério, reforçando a complexidade inerente à tomada de decisão em sistemas urbanos de distribuição de mercadorias.

Os resultados obtidos indicam que a sustentabilidade na última milha não se restringe à redução de emissões ou de custos operacionais de forma isolada, mas está associada à capacidade de equilibrar eficiência econômica, mitigação de externalidades urbanas e melhoria das condições operacionais e sociais do sistema logístico.

A aplicação da abordagem proposta permitiu identificar diferenças significativas entre as alternativas avaliadas, evidenciando que nem todas as soluções frequentemente apontadas pela literatura apresentam o mesmo potencial quando analisadas no contexto da Região Metropolitana de São Paulo. Os resultados revelam que estratégias voltadas à redução de deslocamentos desnecessários e à diminuição da dependência de combustíveis fósseis tendem a produzir benefícios mais equilibrados entre os três capitais da sustentabilidade, enquanto soluções dependentes de estruturas intermediárias mais complexas podem enfrentar limitações operacionais que reduzem sua efetividade prática.

A estrutura de preferências obtida junto aos especialistas indicou predominância do capital econômico (0,614), seguido pelos capitais social (0,268) e ambiental (0,117), indicando que a viabilidade operacional permanece como fator central na tomada de decisão do setor. Ainda assim, os resultados mostram que desempenho econômico e sustentabilidade não constituem objetivos conflitantes de forma inevitável. Pelo contrário, algumas das alternativas avaliadas apresentaram capacidade de gerar ganhos simultâneos nas diferentes dimensões analisadas, indicando que a transição para sistemas logísticos mais sustentáveis pode ocorrer sem comprometimento substancial da eficiência operacional.

Entre os cenários avaliados, a eletrificação parcial da frota apresentou o maior Índice Relativo de Sustentabilidade ($S = 0,76$), configurando-se como a alternativa de melhor desempenho global. Em seguida, destacou-se o cenário de expansão de pontos de coleta e armários inteligentes, com Índice Relativo de Sustentabilidade de $S = 0,72$. As rotas otimizadas associadas a pontos de entrega seguros alcançaram Índice Relativo de Sustentabilidade de $S = 0,67$, posicionando-se acima do cenário atual (Baseline, $S = 0,34$), mas abaixo dos dois cenários mais bem avaliados. Em contraste, a implementação de centros de consolidação de carga apresentou o menor Índice Relativo de Sustentabilidade ($S = 0,26$), tornando-se a alternativa de menor desempenho entre as estratégias analisadas. Esses resultados indicam que a simples adoção de soluções amplamente discutidas na literatura não garante ganhos efetivos de sustentabilidade, sendo fundamental considerar as especificidades territoriais, econômicas e operacionais do ambiente em que serão implementadas.

A análise de sensibilidade reforçou a consistência dos resultados ao indicar que os cenários mais bem posicionados mantiveram elevados Índices Relativos de Sustentabilidade mesmo sob diferentes estruturas de ponderação. Quando a dimensão social assumiu maior relevância, o Cenário 1 apresentou o maior Índice Relativo de Sustentabilidade ($S = 0,76$), seguido pelo Cenário 3 ($S = 0,61$), Cenário 2 ($S = 0,49$) e Cenário 4 ($S = 0,40$), enquanto o cenário Baseline registrou $S = 0,29$. Esse resultado sugere que a expansão de pontos de coleta e armários inteligentes possui maior capacidade de gerar benefícios associados à redução de falhas de entrega e à melhoria da conveniência para os usuários.

Sob a perspectiva ambiental, o Cenário 3 consolidou-se como a alternativa mais sustentável, atingindo Índice Relativo de Sustentabilidade de $S = 0,81$, valor superior ao Cenário 1 ($S = 0,74$), Cenário 4 ($S = 0,63$), Cenário 2 ($S = 0,43$) e Baseline ($S = 0,17$). Esse comportamento evidencia o elevado potencial da eletrificação parcial da frota para reduzir os impactos ambientais associados à logística urbana.

Quando priorizados os aspectos econômicos, o Cenário 3 novamente apresentou o maior Índice Relativo de Sustentabilidade ($S = 0,77$), seguido pelo Cenário 1 ($S = 0,73$) e pelo Cenário 4 ($S = 0,68$). Já o Cenário 2 registrou Índice Relativo de Sustentabilidade de apenas $S = 0,26$, resultado inferior inclusive ao Baseline ($S = 0,34$). Esse comportamento sugere que os custos adicionais relacionados às operações de consolidação urbana podem limitar sua atratividade em determinados contextos operacionais.

De forma geral, os resultados da análise de sensibilidade indicam que o Cenário 1 apresenta maior aderência às prioridades sociais, enquanto o Cenário 3 mantém superioridade quando predominam critérios econômicos e ambientais. O Cenário 4 apresentou comportamento relativamente estável, com Índices Relativos de Sustentabilidade variando entre $S = 0,40$ e $S = 0,68$ conforme o perfil analisado. Por sua vez, o Cenário 2 apresentou a maior variabilidade relativa, oscilando entre $S = 0,26$ e $S = 0,49$, evidenciando maior sensibilidade às mudanças nos pesos dos critérios. Essa estabilidade dos cenários mais bem avaliados fortalece a confiabilidade da abordagem proposta e sugere que os resultados obtidos não dependem exclusivamente de uma única configuração de preferências decisórias.

Do ponto de vista teórico, o estudo contribui ao propor uma estrutura de avaliação integrada baseada nos princípios do Triple Bottom Line, combinando métodos multicritério e simulação de cenários para apoiar análises de sustentabilidade na logística de última milha. Sob a perspectiva prática, os resultados fornecem subsídios para gestores e formuladores de políticas públicas na priorização de estratégias com maior potencial de contribuição para a sustentabilidade urbana, especialmente em grandes centros metropolitanos caracterizados por elevados níveis de congestionamento, restrições operacionais e crescente demanda por entregas associadas ao comércio eletrônico.

Estudos futuros podem explorar a combinação híbrida entre soluções por exemplo, eletrificação parcial da frota associada à expansão de armários inteligentes e otimização de rotas, buscando compreender possíveis efeitos sinérgicos ainda não capturados na avaliação individual dos cenários. Outra direção promissora consiste na incorporação de métricas sociais mais refinadas, relacionadas à acessibilidade logística, equidade territorial e segurança operacional, ampliando a compreensão dos impactos da logística de última milha sobre diferentes grupos urbanos e territórios metropolitanos. Essas abordagens poderão contribuir para o avanço de modelos de decisão mais aderentes à complexidade da logística urbana contemporânea.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABCOMM. **Relatório do Comércio Eletrônico no Brasil 2023**. São Paulo: Associação Brasileira de Comércio Eletrônico, 2023. Disponível em: Acesso em: 28 out. 2025.
- ABRAHAM, K. T. **Responsible leadership and triple bottom line performance: imperatives for corporate sustainability**. Journal of Global Responsibility, v. 15, n. 4, p. 485–500, 2024. <https://doi.org/10.1108/JGR-06-2023-0111>
- AHANI, Y. et al. **The trade-off between economic and environmental sustainability in urban freight transport: A multi-criteria decision-making approach**. Sustainable Cities and Society, v. 98, p. 104812, 2023. <https://doi.org/10.3390/su151612266>
- AHI, Alan A.; SINKOVICS, Noemi; SINKOVICS, R. **E-commerce Policy and the Global Economy: A Path to More Inclusive Development?**. Management International Review 63 (2022): 27 - 56. <https://doi.org/10.1007/s11575-022-00490-1>.
- AHMED, W. et al. **Strategizing risk information sharing framework among supply chain partners for financial performance**. Supply Chain Forum: An International Journal, v. 24, n. 3, p. 233-250, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1080/16258312.2022.2162321>.
- ALIDAEI, Bahram; WANG, Haibo; SUA, Lutfu S. **The last-mile delivery of heavy, bulky, oversized products: literature review and research agenda**. Logistics, v. 7, n. 4, art. 98, 2023. <https://doi.org/10.3390/logistics7040098>
- ALLEN, J.; PIECYK, M.; PIOTROWSKA, M.; MCLEOD, F.; CHERRETT, T.; GHOSH, B.; NGUYEN, T.; BATES, O.; BIRKETT, M. **Understanding the impact of e-commerce on last-mile light goods vehicle activity in urban areas: The case of London**. Transportation Research Part D: Transport and Environment, v. 61, p. 325–338, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.07.020>
- ALLEN, Julian; BROWNE, Michael; WOODBURN, Allan; LEONARDI, Jacques. **The role of urban consolidation centres in sustainable freight transport**. Transport Reviews, [S.l.], v. 32, n. 4, p. 473–490, 2012. <https://doi.org/10.1080/01441647.2012.688074>
- ALVES DE ARAÚJO, Fernanda; MENDES DOS REIS, João Gilberto; TERRA DA SILVA, Marcia; AKTAS, Emel. **A fuzzy analytic hierarchy process model to evaluate logistics service expectations and delivery methods in last-mile delivery in Brazil**. Sustainability, v. 14, n. 10, art. 5753, 2022. <https://doi.org/10.3390/su1410575>
- ALVES, R. et al. **Operational cost analysis for e-commerce deliveries using agent-based modeling and simulation**. Research in Transportation Economics, v. 101, 101348, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2023.101348>
- ANDREI, N.; SCARLAT, C.; IOANID, A. **Transforming e-commerce logistics: sustainable practices through autonomous maritime and last-mile transportation solutions**. Logistics, v. 8, n. 3, p. 71, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/logistics8030071>.
- ARHIPOV, A.; LYASHENKO, S. V. **Logistics concept: content, trends, efficiency**. Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies. <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2022-1-98-104>
- ASSIS, T. F. de et al. **Methodology for Prioritizing Best Practices Applied to the Sustainable Last Mile-The Case of a Brazilian Parcel Delivery Service Company**. Sustainability, v. 14, n. 3812, 2022. <https://doi.org/10.3390/su14073812>

AWA, Awa; RIYANTI, A.; SAFARI, Apay. **Eksplorasi Model Bisnis E-Commerce dan Penerapannya pada Industri Pariwisata**. Tourism Scientific Journal (2024). <https://doi.org/10.32659/tsj.v10i1.401>.

AWASTHI, Anjali; CHAUHAN, Satyaveer S. **A hybrid approach integrating Affinity Diagram, AHP and fuzzy TOPSIS for sustainable city logistics planning**. Applied Mathematical Modelling, v. 36, n. 2, p. 573–584, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2011.07.033>

BAAH, C. et al. **Effect of information sharing in supply chains: understanding the roles of supply chain visibility, agility, collaboration on supply chain performance**. Benchmarking: An International Journal, v. 29, n. 2, p. 434-455, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1108/bij-08-2020-0453>.

BALASKA, Vasiliki et al. **A viewpoint on the challenges and solutions for driverless last-mile delivery**. Machines, Basel, v. 10, n. 11, p. 1059, 2022. DOI: 10.3390/machines10111059.

BALLANO, Aitor, et al. **Agent-based modelling and simulation for hub and electric last mile distribution in Vienna**. 2023, pp. 718-723, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.03.094>.

BÁNYAI, Tamás. **Impact of the Integration of First-Mile and Last-Mile Drone-Based Operations from Trucks on Energy Efficiency and the Environment**. Drones, v. 6, n. 9, art. 249, 2022. DOI: 10.3390/drones6090249.

BASSO, F. et al. **[Artigo sobre Caracterização do Transporte de Carga em Cidades]**. Transportation Research Part A: Policy and Practice, v. 186, 104149, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2024.104149>

BAUM, M.; DIBBELT, J.; GEMSA, A.; WAGNER, D.; ZÜNDORF, T. **Shortest feasible paths with charging stops for battery electric vehicles**. Proceedings of the 23rd SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems. <https://doi.org/10.1145/2820783.2820826>

BAYBIK, G.; SHVANDAR, D. **The strategic role of logistics in increasing the economic security and operational efficiency of an enterprise**. Russian journal of resources, conservation and recycling. <https://doi.org/10.15862/21ecor124>

BEAMON, Benita M. **Measuring supply chain performance**. International Journal of Operations & Production Management, v. 19, n. 3, p. 275–292, 1999. <https://doi.org/10.1108/01443579910249714>.

BHUMIKA, T. et al. **Overview of electronic commerce (E-commerce)**. I-Manager's Journal on Information Technology, v. 11, n. 2, p. 29, 2022. <https://doi.org/10.26634/jit.11.2.18955>

BONILLA, M. A. M.; BOUZON, M.; MONTOYA, C. C. P. **Taxonomy of key practices for a sustainable last-mile logistics network in e-retail: a comprehensive literature review**. Cleaner Logistics and Supply Chain, v. 11, p. 100149, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.clscn.2024.100149>

BOSONA, T. **Urban freight last mile logistics—challenges and opportunities to improve sustainability: a literature review**. Sustainability, v. 12, n. 21, p. 8769, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12218769>.

BOSONA, T.; GEBRESENBET, G.; NORDMARK, I.; LJUNGBERG, D. **Integrated logistics network for the supply chain of locally produced food, Part I: location and route optimization analyses**. Journal of Service Science and Management, v. 4, p. 174–183, 2011. DOI: <https://doi.org/10.4236/jssm.2011.42021>.

BOWERSOX, D. J.; CLOSS, D. J.; COOPER, M. B. **Supply chain logistics management**. New York: McGraw-Hill/Irwin, 2007.

BOYSEN, N.; FEDTKE, S.; SCHWERDFEGER, S. **Last-mile delivery concepts: a survey from an operational research perspective**. OR Spectrum, v. 43, p. 1–58, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00291-020-00607-8>.

BRASIL. Ministério dos Transportes. Secretaria Nacional de Trânsito. **Frota de veículos 2024**. Brasília: Senafran, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/conteudo-Senafran/frota-de-veiculos-2024>. Acesso em: 25 abr. 2025.

BRUGLIERI, M.; ÇATAY, B.; KESKIN, M.; MANCINI, S.; PISACANE, O. **The mixed-fleet vehicle routing problem with low emission zones**. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, v. 201, p. 104230, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2025.104230>.

CABEROY, K.-J. E.; CARSULA, C. L. G.; CHUA, R. J. L.; TINGSON, C. G. B.; UY, R. B. B.; VALDERAMA, A. L. **Factors Affecting Customer Satisfaction of Last-Mile Delivery Logistics**. American Journal of Management. <https://doi.org/10.33423/ajm.v25i2.7630>

CAI, Y. **Empirical insights into mergers and acquisitions through quantitative evaluation of motivations, strategies and outcomes**. Journal of Enterprise and Business Intelligence, p. 1-11, 2024. <https://doi.org/10.53759/5181/JEBI202404001>

CANO, J. A.; LONDOÑO-PINEDA, A.; RODAS, C. **Sustainable logistics for e-commerce: a literature review and bibliometric analysis**. Sustainability, v. 14, n. 19, p. 12247, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su141912247>.

CAPGEMINI RESEARCH INSTITUTE. **The Last-Mile Delivery Challenge**. Paris: Capgemini Research Institute, 2020. Disponível em: <https://www.capgemini.com/insights/research-library/the-last-mile-delivery-challenge/>. Acesso em: 7 jun. 2025.

CASTILLO, Oscar; ÁLVAREZ, R. **Electrification of Last-Mile Delivery: A Fleet Management Approach with a Sustainability Perspective**. Sustainability (2023). <https://doi.org/10.20944/preprints202310.1679.v1>.

CECCATO, R.; GASTALDI, M. **An integrated simulation and optimization approach for sustainable urban freight distribution: The case of cargo bikes**. European Journal of Operational Research, v. 304, n. 3, p. 1133-1149, 2023. <https://doi.org/10.48295/ET.2023.90.3>

CHANDRAMOULI, A. **Optimizing last-mile delivery operations: leveraging predictive analytics, technology integration, and sustainable practices**. Journal of Mathematical & Computer Applications, v. 145, p. 2–7, 2023. DOI: <https://doi.org/10.47363/JMCA/2023>.

CHANG, Y.; JO, Sung Jun; LEE, Yoo-Taek; LEE, Yoo-Taek. **Population Density or Populations Size. Which Factor Determines Urban Traffic Congestion?**. Sustainability 13 (2021): 4280. <https://doi.org/10.3390/su13084280>.

COSTA, A.; FERREIRA, A.; SILVA, Â.; RAMOS, J.; RAMOS, B. **Integration of Reverse Logistics and Continuous Improvement in Portuguese Industry: Perspectives from a Qualitative Survey**. Sustainability. <https://doi.org/10.3390/su17094056>

DADZIE, Eric Bofo; RICHARD, Amponsah. **Evaluating the Role of Logistics in Supply Chain Management**. Dama Academic Scholarly Journal of Researchers (2025). <https://doi.org/10.4314/dasjr.v10i1.5>.

DE ARMAS, J.; MORENO-PÉREZ, J. A. **A Survey on Variable Neighborhood Search for Sustainable Logistics**. Algorithms, v. 18, n. 1, 38, 2025. <https://doi.org/10.3390/a18010038>

DE MAIO, A. et al. **Sustainable last-mile distribution with autonomous delivery robots and public transportation**. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, v. 163, 104615, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2024.104615>

DE SIQUEIRA, J. S.; WERNECK, G. L.; PENA, P. G. L.; DE CÁSSIA PEREIRA FERNANDES, R. **Delivery workers' subordinate work in delivery platform companies and street accidents: magnitude and associated factors**. Cadernos de Saúde Pública, 41. <https://doi.org/10.1590/0102-311xen204723>

DESHPANDE, V.; PENDEM, P. K. **Logistics Performance, Ratings, and Its Impact on Customer Purchasing Behavior and Sales in E-Commerce Platforms**. Manuf. Serv. Oper. Manag., 25, 827-845. <https://doi.org/10.1287/msom.2021.1045>

DREISCHERF, Anna J.; BUIJS, Paul. **How Urban Consolidation Centres affect distribution networks: an empirical investigation from the perspective of suppliers**. Case Studies on Transport Policy, [S.l.], v. 10, n. 1, p. 518–528, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2022.01.012>

EBIT | NIELSENIQ. **A retomada da força do crescimento do e-commerce brasileiro**. [S. l.]: NielsenIQ, 2024. Disponível em: <https://nielseniq.com/global/pt/insights/education/2024/a-retomada-da-forca-do-crescimento-do-ecommerce-brasileiro/>. Acesso em: 25 abr. 2025.

EL MOUSSAOUI, A. E.; BENBBA, B.; JAEGLER, A.; EL ANDALOUSSI, Z.; EL AMRANI, L. **Last mile logistics: challenges & improvement ways**. In: INTERNATIONAL COLLOQUIUM OF LOGISTICS AND SUPPLY CHAIN MANAGEMENT (LOGISTIQUA), 14., 2022, El Jadida, Morocco <https://doi.org/10.1109/LOGISTIQUA55056.2022.9938101>

ELKINGTON, J. **Cannibals with forks: the triple bottom line of 21st century business**. Oxford: Capstone Publishing, 1997.

ENGESSER, Valeska; ROMBAUT, Evy; VANHAVERBEKE, Lieselot; LEBEAU, Philippe. **Autonomous delivery solutions for last-mile logistics operations: a literature review and research agenda**. Sustainability, Basel, v. 15, n. 3, art. 2774, 2023. <https://doi.org/10.3390/su15032774>

ESCUADERO, A.; MUÑOZURI, J.; LORENZO-ESPEJO, A.; MUÑOZ-DÍAZ, M.-L. **Improving E-Commerce Distribution through Last-Mile Logistics with Multiple Possibilities of Deliveries Based on Time and Location**. J. Theor. Appl. Electron. Commer. Res., 17, 507-521. <https://doi.org/10.3390/jtaer17020027>

ESMIZADEH, Y.; PARAST, M. **Logistics and supply chain network designs: incorporating competitive priorities and disruption risk management perspectives**. International Journal of Logistics Research and Applications, v. 24, n. 2, p. 174-197, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/13675567.2020.1744546>

FERREIRA, João C.; ESPERANÇA, M. **Enhancing Sustainable Last-Mile Delivery: The Impact of Electric Vehicles and AI Optimization on Urban Logistics**. World Electric Vehicle Journal (2025). <https://doi.org/10.3390/wevj16050242>.

FRANSEN, Koos; VERSIGGHEL, Jente; GUZMAN VARGAS, Daniel; SEMANJSKI, Ivana; GAUTAMA, Sidharta. **Sustainable mobility strategies deconstructed: a taxonomy of urban vehicle access regulations**. European Transport Research Review, v. 15, n. 1, art. 3, 2023. <https://doi.org/10.1186/s12544-023-00576-3>

FRANSOO, J.; GÜNTHER, H.-O.; JAMMERNEGG, W. **Environmental sustainability in supply chains**. Flexible Services and Manufacturing Journal, v. 26, p. 1–4, 2014. <https://doi.org/10.1007/s10696-013-9189-0>

FRAZZON, E.; RODRIGUEZ, C.; PEREIRA, M.; PIRES, M. C.; UHLMANN, I. R. **Towards Supply Chain Management 4.0**. Brazilian Journal of Operations & Production Management. <https://doi.org/10.14488/bjopm.2019.v16.n2.a2>

GALKIN, Andrii et al. **Navigating the future of urban logistics: conceptual framework for Dynamic Freight Management**. Transportation Research Part D: Transport and Environment, v. 147, p. 104956, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2025.104956>.

GATTA, Valerio; MARCUCCI, Edoardo; NIGRO, Maria; SERAFINI, Simona. **Sustainable urban freight transport adopting public transport-based crowdshipping for B2C deliveries**. European Transport Research Review, v. 11, art. 13, 2019. <https://doi.org/10.1186/s12544-019-0352-x>

GE, Y.; YUAN, Q.; WANG, Y.; PARK, K. **The Structural Relationship among Perceived Service Quality, Perceived Value, and Customer Satisfaction-Focused on Starbucks Reserve Coffee Shops in Shanghai, China**. Sustainability. <https://doi.org/10.3390/su13158633>

GEVAERS, Roel; VAN DE VOORDE, Eddy; VANELSLANDER, Thierry. **Cost modelling and simulation of last-mile characteristics in an innovative B2C supply chain environment with implications on urban areas and cities**. Procedia - Social and Behavioral Sciences, v. 125, p. 398–411, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.01.1483>

GIORDANO, Alessandro; CHRISTIDIS, P. **Green Last-Mile Delivery: Adapting Beverage Distribution to Low Emission Urban Areas**. Future Transportation (2025). <https://doi.org/10.3390/futuretransp5020065>.

GIUFFRIDA, Nadia; FAJARDO-CALDERIN, Jenny; MASEGOSA, Antonio D.; WERNER, Frank; STEUDTER, Margarete; PILLA, Francesco. **Optimization and machine learning applied to last-mile logistics: a review**. Sustainability, Basel, v. 14, n. 9, p. 5329, 2022. <https://doi.org/10.3390/su14095329>

GNONI, Maria Grazia; RUBRICHI, Lorenzo; TORNESE, Fabiana. **Assessing sustainability of smart last mile delivery: a simulation-based decision support tool**. Sustainable Futures, v. 9, art. 100713, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2025.100713>

GODET, Michel. **The art of scenarios and strategic planning: tools and pitfalls**. Technological Forecasting and Social Change, v. 65, n. 1, p. 3–22, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0040-1625\(99\)00120-1](https://doi.org/10.1016/S0040-1625(99)00120-1).

GOHIL, Y.; PATHARE, J.; PALVE, A. **E-Commerce website**. International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET), v. 10, n. 4, p. 2880-2885, 2022.

GOLIŃSKA-DAWSON, P.; SETHANAN, K. **Sustainable Urban Freight for Energy-Efficient Smart Cities—Systematic Literature Review**. Energies. <https://doi.org/10.3390/en16062617>

GOMES, L. F. A. M.; ARAYA, M. C. G.; CARIGNANO, C. **Uma análise do método AHP para avaliação da decisão**. Pesquisa Operacional, v. 24, n. 3, p. 555-573, 2004.

GÖSSLING, S.; KEES, J.; LITMAN, T. **The lifetime cost of driving a car**. Ecological Economics. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2021.107335>

GOULIANOU, Panagiota; REGAN, Amelia; GOODCHILD, Anne. **Long-Term Planning for a Mixed Urban Freight Fleet with EVs and ICEVs in the USA**. Sustainability (2024). <https://doi.org/10.3390/su16083144>.

GRIGORYAN, Harutyun A. **"ELECTRONIC BUSINESS", "ELECTRONIC COMMERCE" CONCEPTS AND MAIN CHARACTERISTICS**. ALTERNATIVE (2023). <https://doi.org/10.55528/18292828-2023.1-127>.

GUO, F. et al. **Robust optimization of microhub network and mixed service strategy for a multidepot location-routing problem**. Computers & Industrial Engineering, v. 190, 110070, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110070>

HALLDÓRSSON, Á.; WEHNER, J. **Last-mile logistics fulfilment: A framework for energy efficiency**. Research in Transportation Business & Management. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2020.100481>

HAQ, Mahin; MOAZZAM, Muhammad; KHAN, Abdul Salam; AHMED, Waqas. **The impact of reverse logistics process coordination on third party relationship quality: a moderated mediation model for multichannel retailers in the fashion industry**. Journal of Retailing and Consumer Services, v. 73. <https://doi.org/10.1016/j.jretconser.2023.103362>

HIRSCHHORN, Fabio; VAN DE VELDE, D.; VEENEMAN, W.; TEN HEUVELHOF, E. **The governance of attractive public transport: Informal institutions, institutional entrepreneurs, and problem-solving know-how in Oslo and Amsterdam**. Research in Transportation Economics (2020). <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2020.100829>.

HUR, Sung Ho; WON, Minsu. **CO₂ emissions and delivery time of last-mile drone delivery using trucks**. IET Intelligent Transport Systems, Hoboken, v. 18, n. 1, p. 101–113, 2024. DOI: 10.1049/itr2.12437

HUTCHINS, Margot J.; SUTHERLAND, John W. **An exploration of measures of social sustainability and their application to supply chain decisions**. Journal of Cleaner Production, v. 16, n. 15, p. 1688–1698, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.06.001>

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Demográfico 2022: panorama do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/?localidade=BR>. Acesso em: 25 abr. 2025.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Custos econômicos da congestionar urbana nas capitais brasileiras**. Brasília: Ipea, 2023. Disponível em: https://www.ipea.gov.br/acessoportunidades/publication/2023_td2922_impacto_congestionamento/. Acesso em: 25 abr. 2025.

JABAR, Adebola Abass; OGUNSOLA, Adebowale. **Analytical review of e-commerce business models**. African Journal of Accounting and Financial Research, [S. l.], v. 5, n. 2, p. 48-60, 2022.. Disponível em: <https://doi.org/10.52589/AJAFR-KMX6O2WV>, v. 5, n. 2, p. 48-60, 2022.

JIAO, J. et al. **An integrated multi-echelon capacitated location-routing problem considering time windows and risk**. Expert Systems with Applications, v. 235, 121175, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.128037>

KAHR, M. **Determining locations and layouts for parcel lockers to support supply chain viability at the last mile**. Omega, 113, 102721 - 102721. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2022.102721>

KANAGAVALLI, G.; AZEEZ, Ramseena. **Logistics and E-Logistics Management: Benefits and Challenges**. International Journal of Recent Technology and Engineering, v. 8, n. 4, p. 12804–12809, nov.2019 <https://doi.org/10.35940/ijrte.d7179.118419>.

KANDULA, S.; KRISHNAMOORTHY, S.; ROY, D. **A prescriptive analytics framework for efficient E-commerce order delivery**. Decis. Support Syst., 147, 113584. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2021.113584>

KEDAH, Zulkarnain. **Use of E-Commerce in The World of Business**. Startuppreneur Business Digital (SABDA Journal) (2023). <https://doi.org/10.33050/sabda.v2i1.273>.

KHREIS, H.; SANCHEZ, K.; FOSTER, M.; BURNS, J.; NIEUWENHUIJSEN, M.; JAIKUMAR, R.; RAMANI, T.; ZIETSMAN, J. **Urban policy interventions to reduce traffic-related emissions and air pollution: A systematic evidence map**. *Environment International*, 172, 107805. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.107805>

KIN, Y. S.; NESTERIOVA, T. **Last-mile logistics and urban land use integration: A critical review and future research agenda**. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 185, 104113, 2024. <https://doi.org/10.1080/09654313.2023.2242400>

KUMARAGE, A. **Transport Logistics: Redefining Logistics in Transport**. *Journal of South Asian Logistics and Transport*, 2021, <https://doi.org/10.4038/jsalt.v1i2.36>.

LAL, Apoorv; RENALDY, Thomas; BREUNING, Larissa; HAMACHER, Thomas; YOU, Fengqi. **Electrifying light commercial vehicles for last-mile deliveries: environmental and economic perspectives**. *Journal of Cleaner Production*, v. 416, p. 137933, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137933>

LATI, Mojtaba; AGHAJANI, Hassan Ali; LOTFI, Mohammad Reza. **Multiobjective three-level supply chain management problem under uncertainty using gravitational search algorithm**. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, v. 2022, art. 2442396, p. 1-11, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/244239>

LEBEAU, P.; MACHARIS, C.; VAN MIERLO, J. **How to improve the total cost of ownership of electric vehicles: an analysis of the light commercial vehicle segment**. *World Electric Vehicle Journal*, v. 10, n. 90, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/wevj10040090>.

LEE, C.-S.; CHEN, Y. G.; FAN, Y.-H. **Structure and components of e-commerce business model**. In: *ENCYCLOPEDIA OF E-COMMERCE, E-GOVERNMENT, AND MOBILE COMMERCE*. Hershey, PA: IGI Global, 2006. p. 1058-1063. <https://doi.org/10.4018/978-1-59140-799-7.ch170>

LI, Chengyu. **E-commerce supply chain control method based on SCOR model**. *Proceedings of the 2025 4th International Conference on Big Data, Information and Computer Network (2025)*. <https://doi.org/10.1145/3727353.3727444>.

LI, L.; HE, X.; KEOLEIAN, G.; KIM, H. C.; DE KLEINE, R. D.; WALLINGTON, T.; KEMP, N. **Life Cycle Greenhouse Gas Emissions for Last-Mile Parcel Delivery by Automated Vehicles and Robots**. *Environmental Science & Technology*. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c08213>

LIIMATAINEN, Heikki; VAN VLIET, Oscar; APLYN, David. **The potential of electric trucks – an international commodity-level analysis**. *Applied Energy*, v. 236, p. 804–814, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.12.017>

LIM, S. F. W.; JIN, X.; SRAI, J. S. **Consumer-driven e-commerce: a literature review, design framework, and research agenda on last-mile logistics models**. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, v. 48, n. 3, p. 308–332, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1108/IJPDLM-02-2017-0081>

LIM, S.; WANG, Q.; WEBSTER, S. **Do it right the first time: Vehicle routing with home delivery attempt predictors**. *Production and Operations Management*, 32, 1262 - 1284. <https://doi.org/10.1111/poms.13926>

LIU, L. et al. **A novel three-way decision-making method for logistics enterprises' carbon trading considering attribute reduction and hesitation degree**. *Information Sciences*, v. 658, p. 119996, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2023.119996>

LIU, L.; LEE, L.; SEOW, H.; CHEN, C. Y. **Logistics Center Location-Inventory-Routing Problem Optimization: A Systematic Review Using PRISMA Method**. Sustainability. <https://doi.org/10.3390/su142315853>

LIU, S.; HASSINI, E. **Freight last mile delivery: a literature review**. Transportation Planning and Technology, v. 47, n. 3, p. 323-369, 2023. <https://doi.org/10.1080/03081060.2023.2268601>

LLORCA, Carlos; MOECKEL, Rolf. **Assessment of the potential of cargo bikes and electrification for last-mile parcel delivery by means of simulation of urban freight flows**. European Transport Research Review, [S.l.], v. 13, art. 33, 2021. <https://doi.org/10.1186/s12544-021-00491-5>.

LYONS, T.; MCDONALD, N. C. **Last-mile strategies for urban freight delivery: a systematic review**. Transportation Research Record, v. 2677, n. 1, p. 1141–1156, 2023. <https://doi.org/10.1177/03611981221103596>

MA, Bohao; WONG, Yiik Diew; TEO, Chee-Chong. **Parcel self-collection for urban last-mile deliveries: a review and research agenda with a dual operations-consumer perspective**. Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, v. 16, p. 100719, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2022.100719>.

MALAFIA, Maria Inês; RIBEIRO, Joel; FONTES, Tânia. **A multi-stakeholder information system for traffic restriction management**. Logistics, Basel, v. 8, n. 4, art. 100, 2024. <https://doi.org/10.3390/logistics8040100>

MANTECCHINI, L.; NANNI COSTA, F. P.; RIZZELLO, V. **Last Mile Urban Freight Distribution: A Modelling Framework to Estimate E-Cargo Bike Freight Attraction Demand Share**. Future Transportation, v. 5, n. 1, 31, 2025. <https://doi.org/10.3390/futuretransp5010031>

MARAVIĆ, A.; PAJIĆ, V.; ANDREJIĆ, M. **A holistic human-based approach to last-mile delivery: stakeholder-based evaluation of logistics strategies**. Logistics, v. 9, n. 4, p. 135, 2025. DOI:

MATINHA, Gustavo Henrique; SANCHES DE ANDRADE, Carlos Eduardo; DE CAMPOS, Claudio Iritani. **Collection and delivery points in the last mile of cargo transportation: Sustainability benefits and challenges**. Annals of Environmental Science and Toxicology, [s. l.], v. 7, n. 1, p. 61-65, 2023. <https://doi.org/10.17352/aest.000071>

MBARE, B. **Psychosocial work environment and mental wellbeing of food delivery platform workers in Helsinki, Finland: A qualitative study**. International Journal of Qualitative Studies on Health and Well-being, 18. <https://doi.org/10.1080/17482631.2023.2173336>

MEJÍAS, Ana M.; PAZ, Enrique; PARDO, Juan E. **Efficiency and sustainability through the best practices in the logistics social responsibility framework**. International Journal of Operations & Production Management, v. 36, n. 2, p. 164–199, 2016. <https://doi.org/10.1108/IJOPM-07-2014-0301>

MISMAR, Haged; SHAMAYLEH, Abdulrahim; QAZI, Abroon. **Prioritizing risks in last mile delivery: a Bayesian belief network approach**. IEEE Access, v. 10, p. 118551-118562, 2022.: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3220626>

MODI, S. **Optimizing Last-Mile Delivery in E-Commerce Logistics and Supply Chain Management**. INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC RESEARCH IN ENGINEERING AND MANAGEMENT. <https://doi.org/10.55041/ijserem49595>

MOHAMMAD, Wassen A. M.; DIAB, Yousef Nazih; ELOMRI, Adel; TRIKI, C. **Innovative solutions in last mile delivery: concepts, practices, challenges, and future directions**. Supply Chain Forum: An International Journal 24 (2023): 151 - 169. <https://doi.org/10.1080/16258312.2023.2173488>.

MOJTAHEDI, Mohammad; FATHOLLAHI-FARD, Amir M.; TAVAKKOLI-MOGHADDAM, Reza; NEWTON, Sidney. **Sustainable vehicle routing problem for coordinated solid waste management**. Journal of Industrial Information Integration, v. 23, art. 100220, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2021.100220>

MORGANTI, Eleonora; SEIDEL, Sabrina; BLANQUART, Corinne; DABLANC, Laetitia; LEMASSON, Emmanuel. **The impact of e-commerce on final deliveries: alternative parcel delivery services in France and Germany**. Transportation Research Procedia, v. 4, p. 178–190, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2014.11.014>

MOSLEHI, M. S.; SAHEBI, H.; TEYMOURI, A. **A multi-objective stochastic model for a reverse logistics supply chain design with environmental considerations**. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, v. 12, n. 7, p. 8017-8040, 2020.

MOZGOVA, G. V.; LIASHEVSKA, V. I.; BILOKON, V. O. **The essence and models of e-business and e-commerce**. Business Inform, v. 1, n. 528, p. 123-131, 2022. <https://doi.org/10.32983/2222-4459-2022-1-123-131>

MUCOWSKA, M. **Trends of environmentally sustainable solutions of urban last-mile deliveries on the e-commerce market: a literature review**. Sustainability, v. 13, n. 11, p. 5894, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13115894>.

MURIEL, Juan E.; ZHANG, Lele; FRANSOO, J.; PEREZ-FRANCO, R. **Assessing the impacts of last mile delivery strategies on delivery vehicles and traffic network performance**. Transportation Research Part C: Emerging Technologies (2022). <https://doi.org/10.1016/j.trc.2022.103915>.

NAGY-BOTA, Ş.; MOLDOVAN, L. **Key Differences and Common Aspects of Logistics and Supply Chain Management**. Acta Marisiensis. Seria Technologica, 19, 42 - 46. <https://doi.org/10.2478/amset-2022-0008>

NGOC, A. M.; NISHIUCHI, H.; NHU, N. T.; HUYEN, L. T. **Ensuring traffic safety of cargo motorcycle drivers in last-mile delivery services in major Vietnamese cities**. Case Studies on Transport Policy. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2022.07.004>

NIEMEIJER, R.; BUIJS, P. **A greener last mile: Analyzing the carbon emission impact of pickup points in last-mile parcel delivery**. Renewable and Sustainable Energy Reviews. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113630>

NIEMEIJER, R.; BUIJS, P. **A greener last mile: Analyzing the carbon emission impact of pickup points in last-mile parcel delivery**. Renewable and Sustainable Energy Reviews (2023). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113630>.

NOGUEIRA, G. P. M.; SILVA, S.; HASENCLEVER, L.; DE ASSIS RANGEL, J. J. **Sustainability in B2C e-commerce: a literature review and future research opportunities in last-mile deliveries**. Environment, Development and Sustainability, 27, 12415 - 12436. <https://doi.org/10.1007/s10668-024-04471-2>

NTUMBA, Charles; AGUAYO, Samuel M.; MAINA, Kamau. **Revolutionizing Retail: A Mini Review of E-commerce Evolution**. Journal of Digital Marketing and Communication (2023). <https://doi.org/10.53623/jdmc.v3i2.365>.

OLIVEIRA, L. K. et al. **Analysis of accessibility from collection and delivery points: towards the sustainability of the e-commerce delivery**. urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana, v. 11, e20190048, 2019. <https://doi.org/10.1590/2175-3369.011.e20190048>

OLIVEIRA, L. K.; OLIVEIRA, R. L. M.; SOUSA, L. T. M.; CALIARI, I. P.; NASCIMENTO, C. O. L. **Analysis of accessibility from collection and delivery points: towards the sustainability of the e-commerce delivery**. urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana, 11, e20190048. <https://doi.org/10.1590/2175-3369.011.e20190048>

OLSSON, J.; HELLSTRÖM, D.; PÅLSSON, H. **Framework of Last Mile Logistics Research: A Systematic Review of the Literature**. Sustainability, v. 11, n. 24, 7131, 2019. <https://doi.org/10.3390/su11247131>

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT (OECD). **Urban Logistics and the Environment**. Paris: OECD Publishing, 2022. Disponível em: https://www.oecd.org/en/publications/urban-logistics-hubs_da4dee9f-en.html. Acesso em: 25 abr. 2025.

ORHAN, Cosku Can; GOEZ, Julio Cesar; GUAJARDO, Mario; OSICKA, Ondrej; WALLACE, Stein W. **Assessing macro effects of freight consolidation on the livability of small cities using vehicle routing as micro models: the case of Bergen, Norway**. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, v. 185, p. 103521, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2024.103521>.

OZANSOY ÇADIRCI, Tuğçe; SAĞKAYA GÜNGÖR, Aysel. **26 years left behind: a historical and predictive analysis of electronic business research**. Electronic Commerce Research, v. 21, n. 1, p. 223-243, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10660-021-09459-y>

OZYAVAS, P.; BUIJS, P.; URSAVAS, E.; TEUNTER, R. **Designing a sustainable delivery network with parcel locker systems as collection and transfer points**. Omega. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2024.103199>

PAIVA, K. M.; CARDOSO, M.; ZANNIN, P. **Exposure to road traffic noise: Annoyance, perception and associated factors among Brazil's adult population**. The Science of the Total Environment, 650 Pt 1, 978-986. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.041>

PANCHAL, Vaishnavi; SHAIKH, P. R. **Importance of E-Commerce**. International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology (2022). <https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.40898>.

PATELLA, S. M. et al. **A adoção de veículos ecológicos na logística da última milha: uma revisão sistemática**. Sustainability, v. 13, n. 1, p. 6, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13010006>.

PEPPEL, Marcel; RINGBECK, Jürgen; SPINLER, Stefan. **How will last-mile delivery be shaped in 2040? A Delphi-based scenario study**. Technological Forecasting and Social Change, v. 177, art. 121493, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121493>

PERBOLI, Guido; ROSANO, Mariangela. **Parcel delivery in urban areas: opportunities and threats for the mix of traditional and green business models**. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, v. 99, p. 19–36, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.01.006>

PEREIRA, Cecília Aparecida; ZUIDGEEST, M.; LIMA, R. **How about including urban informal settlements in city logistics? An equity comparative analysis of e-commerce last mile deliveries**. The International Journal of Logistics Management (2025). <https://doi.org/10.1108/ijlm-05-2024-0304>.

PINCHASIK, D. R.; HOVI, I. B.; DONG, B. **Replacing home deliveries by deliveries to parcel lockers: cost, traffic, emissions, and societal cost effects of locker network expansions in greater Oslo**. International Journal of Logistics Research and Applications, v. 28, n. 4, p. 401–426, 2025. <https://doi.org/10.1080/13675567.2023.2286006>.

POURMOHAMMADREZA, Nima; AKBARI JOKAR, Mohammad Reza. **Efficient last-mile logistics with service options: A multi-criteria decision-making and optimization methodology**. International Journal of Industrial Engineering Computations (2024). <https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2024.2.003>.

POURMOHAMMADREZA, Nima; JOKAR, M. A.; VAN WOENSEL, Tom. **Last-Mile Logistics with Alternative Delivery Locations: A Systematic Literature Review**. Results in Engineering (2025). <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104085>.

PRADANA, M. **Klasifikasi jenis-jenis bisnis e-commerce di Indonesia**. Neo-Bis, v. 9, n. 2, p. 32-40, 2015. DOI: <https://doi.org/10.21107/nbs.v9i2.1271>

PYRA, Mariusz. **Scenario-based analysis of the impact of the electrification of the delivery fleet on the sustainability of e-commerce—forecast until 2050**. Energies, v. 18, n. 6, p. 1503, 2025. <https://doi.org/10.3390/en18061503>.

QUEIROZ, Kennya Vieira; ABE, Jair Minoru; REIS, João Gilberto Mendes dos; RENON, Miguel. **Analysis of strategies to combat cargo theft and robbery in peripheral communities of São Paulo, Brazil, using a paraconsistent expert system**. Logistics, v. 9, n. 1, p. 37, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/logistics9010037>

RANIERI, Leonardo; DIGIESI, Simonetta; SILVESTRI, Brunella; ROCCOTELLI, Michele. **A review of last mile logistics innovations in an externalities cost reduction vision**. Sustainability, Basel, v. 10, n. 3, p. 782, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/su10030782>.

RANJBARI, A. et al. **Do parcel lockers reduce delivery times? Evidence from the field**. Transportation Research Part E, v. 172, p. 103070, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2023.103070>.

RAUTELA, Himanshu; JANJEVIC, Milena; WINKENBACH, M. **Investigating the financial impact of collection-and-delivery points in last-mile E-commerce distribution**. Research in Transportation Business & Management (2021). <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2021.100681>.

REGAL, Andrés; GONZALEZ-FELIU, Jesús; RODRIGUEZ, Michelle. **A spatio-functional logistics profile clustering analysis method for metropolitan areas**. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, v. 179, art. 103312, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2023.103312>.

RISMANTO, H. **Systemic barriers and technological opportunities in transforming urban logistics**. Sinergi International Journal of Logistics, v. 2, n. 3, p. 200–212, 2024. DOI: <https://doi.org/10.61194/sijl.v2i3.730>.

RODRIGUE, Jean-Paul. **The Geography of Transport Systems**. 5. ed. New York: Routledge, 2020. DOI: <https://doi.org/10.4324/9780429346323>.

ROUMBOUTSOS, Athena; KAPROS, Seraphim; VANELSLANDER, Thierry. **Green city logistics: Systems of Innovation to assess the potential of E-vehicles**. Research in Transportation Business & Management, [s. l.], v. 11, p. 43-52, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2014.06.005>.

RUBINO, Gaetana; GATTUSO, Domenico; GRONALT, Manfred. **Modeling the interactions between smart urban logistics and urban access management: a system dynamics perspective**. Applied Sciences, Basel, v. 15, n. 14, art. 7882, 2025. <https://doi.org/10.3390/app15147882>

RZEŚNY-CIEPLIŃSKA, Jagienka; SZMELTER-JAROSZ, Agnieszka. **Stakeholders' analysis of environmental sustainability in urban logistics: a case study of Tricity, Poland**. Energies, Basel, v. 14, n. 5, art. 1274, 2021. <https://doi.org/10.3390/en14051274>

SAATY, Thomas L.; VARGAS, Luis G. **Models, methods, concepts & applications of the Analytic Hierarchy Process**. Boston: Springer, 2012. p. 23–40. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3597-6_2

SAHA, A.; SIMIĆ, V.; SENAPATI, T.; DABIĆ-MILETIĆ, S.; ALA, A. **A Dual Hesitant Fuzzy Sets-Based Methodology for Advantage Prioritization of Zero-Emission Last-Mile Delivery Solutions for Sustainable City Logistics**. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 31, 407-420.
<https://doi.org/10.1109/tfuzz.2022.3164053>

SARIOGUZ, O. **Artificial intelligence for sustainable logistics: reducing carbon emissions and fuel consumption through route optimization**. International Journal of Science and Research Archive, v. 15, n. 3, p. 1527–1537, 2025. DOI: <https://doi.org/10.30574/ijrsra.2025.15.3.1933>.

SAWIK, Barbara. **Optimizing last-mile delivery: a multi-criteria approach with automated smart lockers, capillary distribution and crowdshipping**. Logistics, v. 8, n. 2, p. 52, 2024.
<https://doi.org/10.3390/logistics8020052>

SCHNIEDER, M.; HINDE, C.; WEST, A. A. **Combining Parcel Lockers with Staffed Collection and Delivery Points: An Optimization Case Study Using Real Parcel Delivery Data (London, UK)**. Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity.
<https://doi.org/10.3390/joitmc7030183>

SEADE. **Indicadores Econômicos da Região Metropolitana de São Paulo 2024**. São Paulo: Fundação Seade, 2024. Disponível em: <https://piib.seade.gov.br/integra/>. Acesso em: 10 jun. 2025.

SHAFIE, S. M. H.; MAHMUD, M. **Urban Air Pollutant from Motor Vehicle Emissions in Kuala Lumpur, Malaysia**. Aerosol and Air Quality Research, 20, 2793 - 2804.
<https://doi.org/10.4209/aaqr.2020.02.0074>

SHESTAKOV, A. V.; ZUENKO, A. **Logistics tasks: classification and methods of solution**. Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences.
<https://doi.org/10.37614/2949-1215.2022.13.2.014>

SHETTAR, R. M. **E-commerce: an empirical study**. Productivity, v. 64, n. 2, p. 115-122, 2023. Doi: <https://doi.org/10.32381/PROD.2023.64.02.1>

SHIBAO, Fábio Ytoshi; SANTOS, Mario Roberto dos. **Veículos sustentáveis na última milha: transporte de carga urbana**. Brazilian Journal of Business, Curitiba, v. 3, n. 1, p. 606–623, jan./mar. 2021. DOI: <https://doi.org/10.34140/bjbv3n1-037>

SILVA, B. T.; SAMPAIO, M. **Factors influencing cargo robbery in last-mile delivery of e-commerce: an empirical study in Brazil**. J Transp Secur 16, 10 (2023).
<https://doi.org/10.1007/s12198-023-00267-z>

SILVA, F. H. N. da et al. **Sustentabilidade na Logística de Última Milha: Avaliação de cenários para a cidade de São Paulo**. Revista Brasileira de Engenharia de Produção, v. 29, n. 1, p. 1-19, 2023.

SILVA, V.; AMARAL, A.; FONTES, T. **Sustainable urban last-mile logistics: a systematic literature review**. Sustainability, v. 15, n. 3, p. 2285, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15032285>.

SINGH, Mohini. **E-Business Developmental Issues in the Australian Food Industry**. Australasian Journal of Information Systems, Australia, v. 12, n. 1, 2004. DOI: 10.3127/ajis.v12i1.103.

ŠKULTÉTY, Filip; BEŇOVÁ, Dominika; GNAP, Jozef. **City logistics as an imperative smart city mechanism: scrutiny of clustered EU27 capitals**. Sustainability, Basel, v. 13, n. 7, p. 3641, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13073641>.

SOKOLOVA, N.; TITOVA, O. **ONLINE STORE AS A COMPONENT OF E-COMMERCE AND DIGITAL BUSINESS TRANSFORMATION**. Social'no-ekonomiceskoe upravlenie: teoria i praktika, 2024, <https://doi.org/10.22213/2618-9763-2024-2-76-87>.

SONG, L.; CHERRETT, T.; MCLEOD, F.; GUAN, W. **Addressing the Last Mile Problem**. Transportation Research Record, 2097, 18 - 9. <https://doi.org/10.3141/2097-02>

SRIVATSA SRINIVAS, S.; MARATHE, R. R. **Moving towards "mobile warehouse": last-mile logistics during COVID-19 and beyond**. Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, v. 10, p. 100339, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2021.100339>

TAEFI, T. T. et al. **Comparative analysis of European examples of freight electric vehicles schemes: a systematic case study approach with examples from Denmark, Germany, the Netherlands, Sweden and the UK**. In: KOTZAB, Herbert; PANNEK, Jürgen; THOBEN, Klaus-Dieter (eds.). Dynamics in logistics. Cham: Springer, 2016. p. 555–567. https://doi.org/10.1007/978-3-319-23512-7_48

TEMPORELLI, Andrea; BRAMBILLA, P.; BRIVIO, E.; GIRARDI, P. **Avaliação do ciclo de vida da logística da última milha: uma análise comparativa de vans a diesel a bicicletas de carga elétricas**. Energies (2022). <https://doi.org/10.3390/en15207817>.

SAATY, Thomas L. **The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation**. New York: McGraw-Hill, 1980.

TIWARI, Saurabh. **Smart warehouse: a bibliometric analysis and future research direction**. Sustainable Manufacturing and Service Economics, v. 2, art. 100014, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.smse.2023.100014>

TSAI, J.-F.; NGO, H.-N.; CHE, Z.-H. **Last-mile delivery during COVID-19: A systematic review of parcel locker adoption and consumer experience**. Acta Psychologica, 249, 104462. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2024.104462>

TSAI, Yao-Te; TIWASING, Praewwanit. **Customers' intention to adopt smart lockers in last-mile delivery service: A multi-theory perspective**. Journal of Retailing and Consumer Services (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jretconser.2021.102514>.

TURCHYN, L.; KUNEŠOVÁ, H. **E-commerce as a modern paradigm of formation and use of marketing tools**. Trendy v Podnikání, v. 12, n. 2, p. 88-100, 2022. https://doi.org/10.24132/jbt.2022.12.2.88_100

ULLAH, Mehran. **Impact of transportation and carbon emissions on reverse channel selection in closed-loop supply chain management**. Journal of Cleaner Production, v. 394, art. 136370, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136370>

USECHE, S.; TRAFICANTE, S.; LLAMAZARES, F. J.; MARIN, C. **The human cost of fast deliveries: A systematic literature review of occupational risks and safety outcomes in last-mile delivery workers**. Journal of Transport & Health. <https://doi.org/10.1016/j.jth.2025.102133>

VAN HEESWIJK, Wouter; LARSEN, Rune; LARSEN, Allan. **An urban consolidation center in the city of Copenhagen: a simulation study**. International Journal of Sustainable Transportation, v. 13, n. 9, p. 675–691, 2019. <https://doi.org/10.1080/15568318.2018.1503380>.

VAN VLIET, J. E.; DE BOK, M. A.; ATASOY, B.; HOMEM DE ALMEIDA CORREIA, G. **The evolution of consumer preferences in last-mile delivery methods and the impact on urban logistics: a simulation study in the Rotterdam-The Hague region**. Research in Transportation Economics, v. 113, art. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2025.101624>

VEIGA, Claudimar Pereira da; VEIGA, Cássia Rita Pereira da; MICHEL, Júlia de Souza Silva; DI IORIO, Leandro Ferreira; SU, Zhaohui. **E-commerce in Brazil: an in-depth analysis of digital growth and strategic approaches for online retail**. Journal of Theoretical and Applied Electronic Commerce Research, v. 19, n. 2, p. 1559-1579, 2024. <https://doi.org/10.3390/jtaer19020076>

VILLA, Raúl; MONZÓN, Andrés. **A metro-based system as sustainable alternative for urban logistics in the era of e-commerce**. Sustainability, Basel, v. 13, n. 8, p. 4479, 2021.

WANG, H.; CHEN, S.; LI, M.; ZHU, C.; WANG, Z. **Demand-driven charging strategy-based distributed routing optimization under traffic restrictions in Internet of Electric Vehicles**. IEEE Internet of Things Journal, v. 11, n. 22, p. 35917–35927, 15 nov. 2024. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2024.3383876>.

WANG, T.; BAE, H. **Two-echelon location-routing problem for sustainable city logistics using a mixed-integer linear programming model**. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, v. 152, 102395, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/6665610>

WANG, W. et al. **Equity-oriented vehicle routing optimization for catering distribution services**. IET Intelligent Transport Systems, v. 16, n. 2, 2022. <https://doi.org/10.1049/itr2.12136>

WERNER-LEWANDOWSKA, K.; GOLINSKA-DAWSON, P. **Sustainable Logistics Management Maturity—The Theoretical Assessment Framework and Empirical Results from Poland**. Sustainability, v. 13, n. 9, art. 5102, 2021. <https://doi.org/10.3390/su13095102>

WEST, Jarle; BÖRJESSON, Maria. **The Gothenburg congestion charges: cost–benefit analysis and distribution effects**. Transportation, v. 47, n. 1, p. 145–174, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11116-017-9853-4>

WU, Hang; LI, Ming; YU, Chenglin; OUYANG, Zhiyuan; LAI, Kee-hung; ZHAO, Zhiheng; PAN, Shenle; WANG, Shuaian; ZHONG, Ray Y.; KUO, Yong-Hong; ZHANG, Fangni; HUANG, Wenjie; SHEN, Zuo-Jun Max; BALLOT, Eric; HUANG, George Q. **Towards cyber-physical internet: a systematic review, fundamental model and future perspectives**. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, v. 197, art. 104051, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2025.104051>

YERGOBEK, D.; YDYRYS, S. **Concept and essence of logistics**. Bulletin of the National Engineering Academy of the Republic of Kazakhstan, 2020, <https://doi.org/10.47533/2020.1606-146x.48>.

ZAMORANO-GONZÁLEZ, B.; PEÑA-CARDENAS, F.; VELÁZQUEZ-NARVÁEZ, Y.; PARRA-SIERRA, V.; VARGAS-MARTÍNEZ, J. I.; MONREAL-ARANDA, O.; RUÍZ-RAMOS, L. **Traffic Noise Annoyance in the Population of North Mexico: Case Study on the Daytime Period in the City of Matamoros**. Frontiers in Psychology, 12. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.657428>

ZENNARO, Irene; FINCO, Stefano; CALZAVARA, Massimo; PERSONA, Alessandro. **Implementing e-commerce from logistic perspective: literature review and methodological framework**. Sustainability, Basel, v. 14, n. 2, p. 911, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14020911>

ZHANG, Qian-Ru; DEMIR, Emrah. **Parcel locker solutions for last mile delivery: a systematic literature review and future research directions**. Frontiers in Future Transportation, v. 6, 2025. <https://doi.org/10.3389/ffutr.2025.1654621>

ZHANG, Y. **Research on the Sustainable Development Assessment System of Chinese Logistics Enterprises in the Context of Digital Intelligence and Dual Carbon Era**. Advances in Economics, Management and Political Sciences, v. 138, p. 54-60, 2025. <https://doi.org/10.54254/2754-1169/2024.19221>

ZHANG, Yumeng; BI, Mengyu; LAI, Jianhui; CHEN, Yanyan. **A Robust Optimization Method for Location Selection of Parcel Lockers under Uncertain Demands**. Mathematics (2022). <https://doi.org/10.3390/math10224289>.

FAURE, J. **Impact of e-commerce growth on urban logistics in France**. International Journal of Supply Chain and Logistics, v. 8, n. 3, p. 16–27, 2024. DOI: <https://doi.org/10.47941/ijscsl.2356>.

ZHU, Xiaonan; CAI, Lanhui; LAI, Polin; WANG, Xueqin; MA, Fei. **Evolution, Challenges, and Opportunities of Transportation Methods in the Last-Mile Delivery Process**. Syst. 11 (2023): 509. <https://doi.org/10.3390/systems11100509>.

ZHUCHENKO, A.; YATSINA, Ye.; MOSKVICHENKO, I. **THE FUTURE OF LAST MILE LOGISTICS**. collection of conference abstracts "INNOVATIONS IN MANAGEMENT" (2023). <https://doi.org/10.31375/978-966-7716-94-3-17-19>.

ZHUMADILOVA, M. A.; DUSSIPOV, Y. S.; AITIMOV, B. Z. **The concept of legal regulation of electronic commerce**. Reports, v. 2, n. 330, p. 131-138, 2020. <https://doi.org/10.26512/lstr.v15i1.43829>

APÊNDICE A – Roteiro de Entrevista com Operador Logístico

Perfil do entrevistado

1. Qual é sua função atual e há quanto tempo atua na área de logística de última milha?
2. O operador logístico atua predominantemente em operações B2C, B2B ou mistas?

Desafios operacionais

3. Quais são, em sua percepção, os principais desafios operacionais enfrentados atualmente na logística de última milha em áreas urbanas como a Região Metropolitana de São Paulo?
4. As falhas na primeira tentativa de entrega representam um problema relevante na operação? Quais fatores mais contribuem para esse insucesso?
5. Há iniciativas voltadas à redução do consumo de combustível ou das emissões de CO₂ nas operações de última milha? Quais estratégias são consideradas mais viáveis operacionalmente?
6. Soluções como veículos elétricos, bicicletas de carga ou lockers urbanos são aplicáveis ao contexto da empresa? Quais limitações são observadas?
7. De que forma a operação de última milha impacta a geração de empregos diretos ou indiretos?
8. Questões de segurança (roubo de carga, riscos ao motorista) influenciam o planejamento das rotas e das entregas?
9. Na sua percepção, quais soluções logísticas apresentam maior potencial para melhorar simultaneamente o desempenho econômico, ambiental e social da última milha?
10. Há barreiras regulatórias, econômicas ou comportamentais que dificultam a adoção de soluções mais sustentáveis?

APÊNDICE B – Questionário AHP

Critério de Avaliação para Entrega de Última Milha

Comparação entre pares Critérios

3 comparação entre o(s) par(es). Faça a comparação entre pares de todos os critérios. Quando completo, clique em *Verificar Consistência* para obter as prioridades.

Escala AHP : 1- Mesma importância, 3- Importância Moderada, 5- Alta importância, 7- Muito alta importância, 9- Extrema importância (2,4,6,8 valores entre este intervalo).

Com relação a **Critérios**, qual critério é mais importante, e quanto mais em uma escala de 1 a 9?

A - wrt Critérios - or B?		Igual	Quanto mais?
1 ☒ Social	☐ Econômico	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
2 ☒ Social	☐ Ambiental	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
3 ☒ Econômico	☐ Ambiental	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9

Comparação entre pares Subcritérios

66 comparação entre o(s) par(es). Faça a comparação entre pares de todos os critérios. Quando completo, clique em *Verificar Consistência* para obter as prioridades.

Escala AHP : 1- Mesma importância, 3- Importância Moderada, 5- Alta importância, 7- Muito alta importância, 9- Extrema importância (2,4,6,8 valores entre este intervalo).

Com relação a **Subcritérios**, qual critério é mais importante, e quanto mais em uma escala de 1 a 9?

A - wrt Subcritérios - or B?		Igual	Quanto mais?
1 ☒ Conveniência	☐ Inclusão digital	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
2 ☒ Conveniência	☐ Satisfação do consumidor	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
3 ☒ Conveniência	☐ Segurança	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
4 ☒ Conveniência	☐ Custo da entrega	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
5 ☒ Conveniência	☐ Tempo de entrega	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
6 ☒ Conveniência	☐ Programas de recompensa	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
7 ☒ Conveniência	☐ Eficiência operacional	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
8 ☒ Conveniência	☐ Emissões de CO2	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
9 ☒ Conveniência	☐ Embalagens sustentáveis	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
11 ☒ Conveniência	☐ Logística reversa	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
12 ☒ Inclusão digital	☐ Satisfação do consumidor	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
13 ☒ Inclusão digital	☐ Segurança	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
14 ☒ Inclusão digital	☐ Custo da entrega	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
15 ☒ Inclusão digital	☐ Tempo de entrega	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
16 ☒ Inclusão digital	☐ Programas de recompensa	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
17 ☒ Inclusão digital	☐ Eficiência operacional	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
18 ☒ Inclusão digital	☐ Emissões de CO2	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
19 ☒ Inclusão digital	☐ Embalagens sustentáveis	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
20 ☒ Inclusão digital	☐ Roteirização	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
21 ☒ Inclusão digital	☐ Logística reversa	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
22 ☒ Satisfação do consumidor	☐ Segurança	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
23 ☒ Satisfação do consumidor	☐ Custo da entrega	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
24 ☒ Satisfação do consumidor	☐ Tempo de entrega	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
25 ☒ Satisfação do consumidor	☐ Programas de recompensa	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
26 ☒ Satisfação do consumidor	☐ Eficiência operacional	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9

27	☒ Satisfação do consumidor	☐ Emissões de CO2	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
28	☒ Satisfação do consumidor	☐ Embalagens sustentáveis	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
29	☒ Satisfação do consumidor	☐ Roteirização	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
30	☒ Satisfação do consumidor	☐ Logística reversa	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
31	☒ Segurança	☐ Custo da entrega	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
32	☒ Segurança	☐ Tempo de entrega	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
33	☒ Segurança	☐ Programas de recompensa	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
34	☒ Segurança	☐ Eficiência operacional	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
35	☒ Segurança	☐ Emissões de CO2	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
36	☒ Segurança	☐ Embalagens sustentáveis	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
37	☒ Segurança	☐ Roteirização	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
38	☒ Segurança	☐ Logística reversa	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
39	☒ Custo da entrega	☐ Tempo de entrega	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
40	☒ Custo da entrega	☐ Programas de recompensa	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
41	☒ Custo da entrega	☐ Eficiência operacional	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
42	☒ Custo da entrega	☐ Emissões de CO2	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
43	☒ Custo da entrega	☐ Embalagens sustentáveis	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
44	☒ Custo da entrega	☐ Roteirização	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
45	☒ Custo da entrega	☐ Logística reversa	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
46	☒ Tempo de entrega	☐ Programas de recompensa	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
47	☒ Tempo de entrega	☐ Eficiência operacional	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
48	☒ Tempo de entrega	☐ Emissões de CO2	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
49	☒ Tempo de entrega	☐ Embalagens sustentáveis	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
50	☒ Tempo de entrega	☐ Roteirização	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
51	☒ Tempo de entrega	☐ Logística reversa	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
52	☒ Programas de recompensa	☐ Eficiência operacional	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
53	☒ Programas de recompensa	☐ Emissões de CO2	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
54	☒ Programas de recompensa	☐ Embalagens sustentáveis	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
55	☒ Programas de recompensa	☐ Roteirização	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
56	☒ Programas de recompensa	☐ Logística reversa	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
57	☒ Eficiência operacional	☐ Emissões de CO2	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
58	☒ Eficiência operacional	☐ Embalagens sustentáveis	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
59	☒ Eficiência operacional	☐ Roteirização	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
60	☒ Eficiência operacional	☐ Logística reversa	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
61	☒ Emissões de CO2	☐ Embalagens sustentáveis	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
62	☒ Emissões de CO2	☐ Roteirização	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
63	☒ Emissões de CO2	☐ Logística reversa	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
64	☒ Embalagens sustentáveis	☐ Roteirização	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
65	☒ Embalagens sustentáveis	☐ Logística reversa	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
66	☒ Roteirização	☐ Logística reversa	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9

APÊNDICE C – Código Python para a análise de Monte Carlo sobre o indicador de sustentabilidade

```
import numpy as np
import pandas as pd

# Configurações da simulação
iteracoes = 10000
colunas = ['Baseline', 'Cenario 1', 'Cenario 2', 'Cenario 3', 'Cenario 4']

# Pesos dos indicadores
peso_consumo = 0.118
peso_empregados = 0.268
peso_custo = 0.614

def normalizar_direcional(valores, maior_melhor=True):
    """Realiza a normalização linear considerando a direção do indicador."""
    v_min, v_max = min(valores), max(valores)

    # Tratamento para evitar divisão por zero se todos os valores forem iguais
    if v_max == v_min:
        return [1.0 if maior_melhor else 1.0 for _ in valores]

    if maior_melhor:
        # Quanto maior, melhor: (valor - min) / (max - min)
        return [(v - v_min) / (v_max - v_min) for v in valores]
    else:
        # Quanto menor, melhor: 1 - ((valor - min) / (max - min))
        return [1 - ((v - v_min) / (v_max - v_min)) for v in valores]

resultados_finais = []

for _ in range(iteracoes):
    # 1. Sorteio dos valores brutos para os 5 cenários
    # Ordem: [Baseline, C1, C2, C3, C4]
    brutos_consumo = [
        100,
        np.random.uniform(68, 87),
        np.random.uniform(79, 89),
        np.random.uniform(52, 85),
        np.random.uniform(70, 85)
    ]

    brutos_empregados = [
        100,
        np.random.uniform(130, 140),
        np.random.uniform(115, 130),
        np.random.uniform(100, 105),
        np.random.uniform(80, 90)
    ]

    brutos_custo = [
        100,
        np.random.uniform(93, 97),
        np.random.uniform(102, 124),
        np.random.uniform(83, 90),
        np.random.uniform(80, 90)
    ]
```

```

# 2. Normalização após a rodada de sorteio
# Consumo e Custo: Quanto menor, melhor (maior_melhor=False)
# Empregados: Quanto maior, melhor (maior_melhor=True)
norm_consumo = normalizar_direcional(brutos_consumo, maior_melhor=False)
norm_empregados = normalizar_direcional(brutos_empregados, maior_melhor=True)
norm_custo = normalizar_direcional(brutos_custo, maior_melhor=False)

# 3. Cálculo de S para cada cenário na iteração atual
linha_s = []
for i in range(5):
    s_calculado = (norm_consumo[i] * peso_consumo +
                   norm_empregados[i] * peso_empregados +
                   norm_custo[i] * peso_custo)
    linha_s.append(s_calculado)

resultados_finais.append(linha_s)

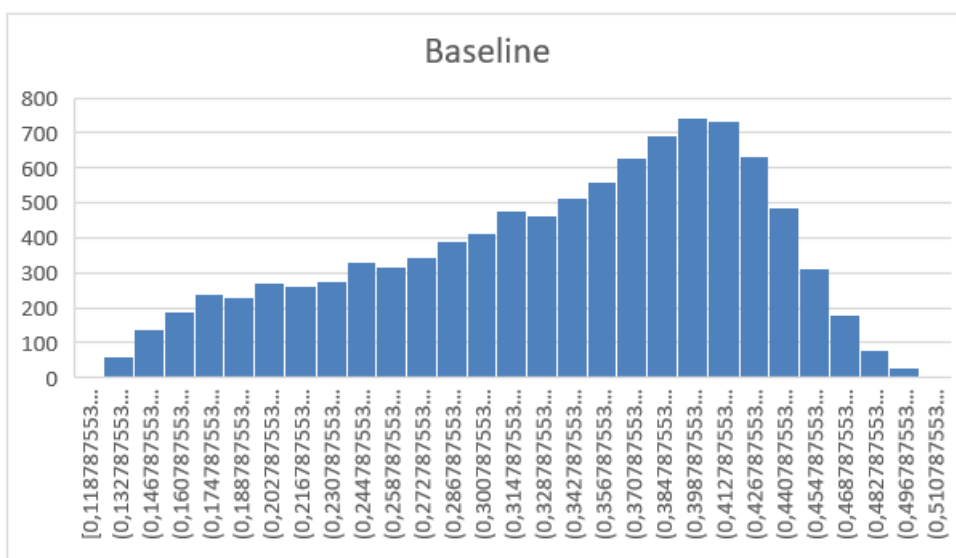
# 4. Gerar DataFrame e exportar para Excel
df_simulacao = pd.DataFrame(resultados_finais, columns=colunas)
df_simulacao.to_excel('Simulacao_Monte_Carlo_Final.xlsx', index=False)

print("Simulação concluída! Arquivo 'Simulacao_Monte_Carlo_Final.xlsx' gerado.")

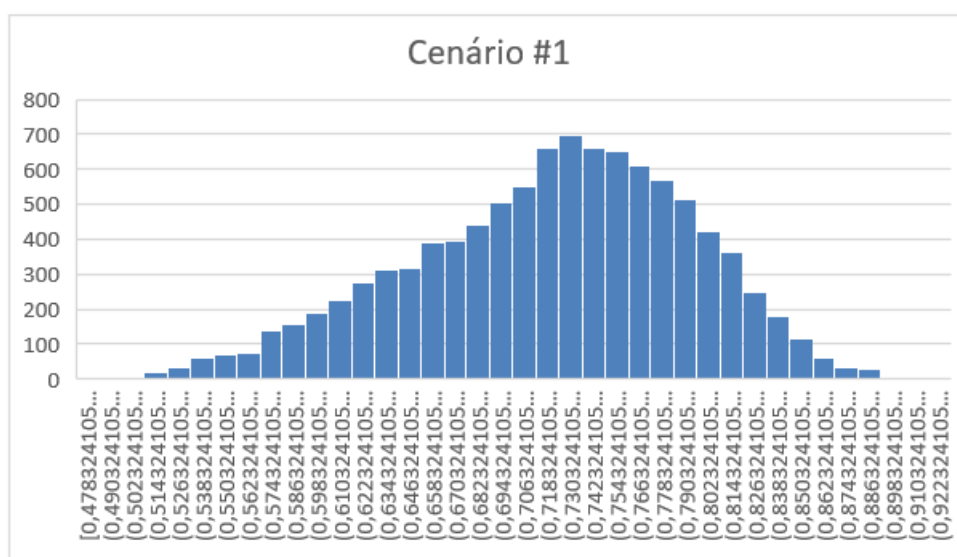
```

APÊNDICE D – Gráficos da Simulação de Monte Carlo dos Cenários e do Baseline

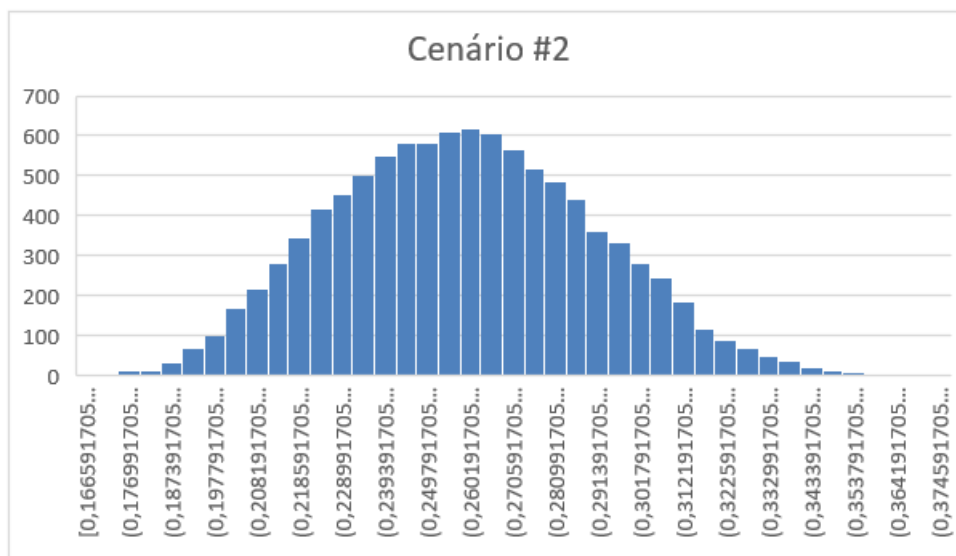
Média = 0,3424 Mediana = 0,3588
 Desvio Padrão = 0,072423
 S = 0,34 ± 0,14



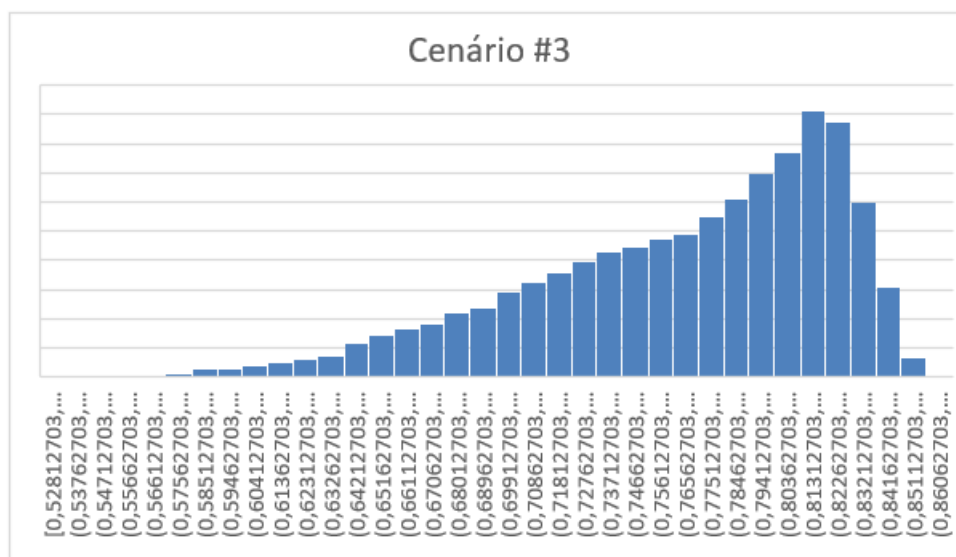
Média = 0,7258 Mediana = 0,7335
 Desvio Padrão = 0,059202
 S = 0,73 ± 0,12



Média = 0,2614 Mediana = 0,2607
 Desvio Padrão = 0,025927
 S = 0,26 ± 0,05



Média = 0,7685 Mediana = 0,7819
 Desvio Padrão = 0,04794
 S = 0,77 ± 0,09

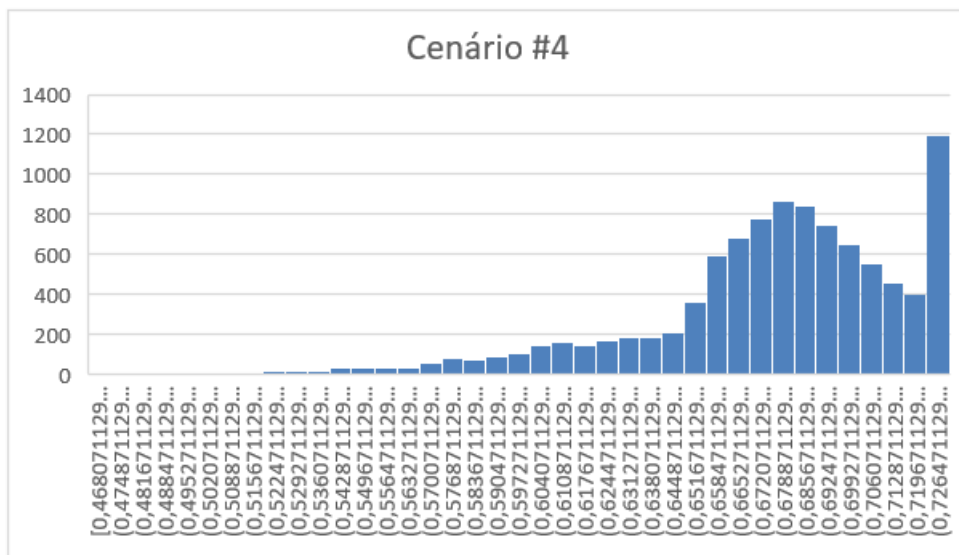


Média = 0,6785

Mediana = 0,6845

Desvio Padrão = 0,031209

S = 0,68 ± 0,06



APÊNDICE E – Base de dados e resultados da análise de sensibilidade por perfis de pesos

Equilibrado

Classe	Baseline	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
0,00	0	0	0	0	0
0,05	0	0	0	0	0
0,10	477	0	0	0	0
0,15	1734	0	0	0	0
0,20	2868	0	0	0	0
0,25	3946	0	91	0	0
0,30	975	0	1082	0	0
0,35	0	0	2834	0	32
0,40	0	0	3133	0	363
0,45	0	0	1860	0	1802
0,50	0	8	758	28	2590
0,55	0	90	199	221	2235
0,60	0	525	41	643	1656
0,65	0	1450	2	1453	1322
0,70	0	2104	0	3107	0
0,75	0	2164	0	4087	0
0,80	0	1739	0	461	0
0,85	0	1490	0	0	0
0,90	0	426	0	0	0
0,95	0	4	0	0	0
1,00	0	0	0	0	0
1,10	0	0	0	0	0

10000 10000 10000 10000 10000

Média =	0,24	0,77	0,42	0,73	0,56
Mediana =	0,25	0,77	0,41	0,74	0,55
Desvio =	0,05	0,08	0,06	0,05	0,07
S =	0,24	0,77	0,42	0,73	0,56
	±	±	±	±	±
	0,10	0,16	0,12	0,11	0,13

Socialmente

Baseline	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
1	0	0	0	0
391	0	0	0	0
1707	0	0	0	0
3227	0	0	0	42
3529	0	16	0	709
1132	0	593	0	4649
13	0	2207	9	3653
0	0	3069	116	947
0	0	2485	856	0
0	0	1339	3071	0
0	0	281	4285	0
0	9	10	1619	0
0	341	0	44	0
0	1710	0	0	0
0	3785	0	0	0
0	3139	0	0	0
0	1003	0	0	0
0	13	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

10000 10000 10000 10000 10000

0,29	0,84	0,49	0,61	0,40
0,30	0,84	0,49	0,61	0,40
0,05	0,05	0,06	0,04	0,03
0,29	0,84	0,49	0,61	0,40
±	±	±	±	±
0,10	0,09	0,12	0,08	0,07

Ambientalmente

Baseline	Cenario 1	Cenario 2	Cenario 3	Cenario 4
0	0	0	0	0
536	0	0	0	0
2614	0	0	0	0
4918	0	0	0	0
1932	0	3	0	0
0	0	345	0	0
0	0	1524	0	0
0	0	2346	0	15
0	3	2113	0	274
0	57	1646	0	888
0	438	1076	21	1382
0	862	561	129	1805
0	1205	234	405	1462
0	1417	121	594	1156
0	1430	31	662	957
0	1132	0	1000	1113
0	1028	0	3200	948
0	1244	0	3989	0
0	1152	0	0	0
0	32	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
10000	10000	10000	10000	10000
0,17	0,74	0,43	0,81	0,63
0,17	0,73	0,42	0,84	0,62
0,04	0,12	0,09	0,07	0,11
0,17	0,74	0,43	0,81	0,63
±	±	±	±	±
0,07	0,23	0,17	0,14	0,21

Economicamente

Baseline	Cenario 1	Cenario 2	Cenario 3	Cenario 4
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
117	0	0	0	0
737	0	171	0	0
970	0	3607	0	0
1226	0	5040	0	0
1659	0	1154	0	0
2189	0	28	0	0
2352	0	0	0	0
724	7	0	0	13
26	145	0	2	111
0	480	0	61	476
0	1010	0	345	1214
0	1763	0	1019	4931
0	2489	0	1930	3255
0	2571	0	2840	0
0	1275	0	3709	0
0	241	0	94	0
0	19	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
10000	10000	10000	10000	10000
0,34	0,73	0,26	0,77	0,68
0,36	0,73	0,26	0,78	0,68
0,09	0,07	0,03	0,06	0,04
0,34	0,73	0,26	0,77	0,68
±	±	±	±	±
0,17	0,15	0,06	0,11	0,08

APÊNDICE F – Resultados da avaliação multicritério das alternativas por critérios e subcritérios do AHP

Critérios	Subcritérios	Alternativas			
		Entrega Expressa	Entrega Regular	Entrega Sustentável	Smart Lockers
Social (0,268)	Inclusão Digital (0,101)	0,250	0,250	0,250	0,250
	Conveniência (0,141)	0,270	0,081	0,154	0,494
	Segurança (0,483)	0,276	0,118	0,118	0,487
	Satisfação Cliente (0,276)	0,489	0,103	0,251	0,157
	Emissão de CO ₂ (0,483)	0,066	0,116	0,538	0,280
Ambiental (0,117)	Logística Reversa (0,176)	0,096	0,368	0,169	0,368
	Roteirização Verde (0,247)	0,094	0,164	0,433	0,308
	Embalagens Sustentáveis (0,094)	0,250	0,250	0,250	0,250
	Custo de Entrega (0,242)	0,071	0,125	0,225	0,579
	Eficiência Operacional (0,501)	0,087	0,364	0,163	0,385
Econômico (0,614)	Tempo de Entrega (0,172)	0,494	0,154	0,081	0,270
	Programas de Recompensa (0,084)	0,488	0,103	0,250	0,157