

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO**

**DISRUPSIM: UMA FERRAMENTA DE APOIO À
DECISÃO PARA PROMOÇÃO DA RESILIÊNCIA DO
TRANSPORTE URBANO DE CARGAS DO E-
COMMERCE DURANTE EVENTOS DISRUPTIVOS**

KAÍQUE OSÓRIO ALVES NETO SILVA

**ITAJUBÁ-MG
2024**

KAÍQUE OSÓRIO ALVES NETO SILVA

DISRUPSIM: UMA FERRAMENTA DE APOIO À DECISÃO PARA PROMOÇÃO DA RESILIÊNCIA DO TRANSPORTE URBANO DE CARGAS DO E- COMMERCE DURANTE EVENTOS DISRUPTIVOS

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Ciências em Engenharia de Produção.

Área de Concentração: Sistemas de Produção e Logística

Orientador: Prof. Dr. Renato da Silva Lima

Coorientadora: Prof. Dra. Roberta Alves

ITAJUBÁ-MG

2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO

KAÍQUE OSÓRIO ALVES NETO SILVA

DISRUPSIM: UMA FERRAMENTA DE APOIO À DECISÃO PARA
PROMOÇÃO DA RESILIÊNCIA DO TRANSPORTE URBANO DE
CARGAS DO E-COMMERCE DURANTE EVENTOS DISRUPTIVOS

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Ciências em Engenharia de Produção.

Banca Examinadora:

Profa. Dra. Renata Lucia Magalhaes De Oliveira (CEFET/MG)

Prof. Dr. Paulo Rotella Junior (UFPB)

Prof. Dr. Rafael de Carvalho Miranda (UNIFEI)

Prof. Dr. Alexandre Ferreira de Pinho (UNIFEI)

Prof. Dr. Renato da Silva Lima (UNIFEI) (Orientador)

:
Profa. Dra. Roberta Alves (UFLA) (Coorientadora)

ITAJUBÁ-MG

2024

“O que é eterno nunca morre, vive pra sempre em nossos corações.”

Dedicado àquele que hoje, olha por mim lá de cima

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por sempre me dar forças, guiar minhas escolhas, possibilitar todas as minhas conquistas e colocar as melhores pessoas no meu caminho.

Ao meu querido e amado avô e pai, pelo amor e incentivo. Por ser meu porto seguro me apoiando desde o início, mesmo hoje não estando mais aqui. Agradeço por me incentivar, torcer por mim, me apoiar nos momentos de insegurança e por ser minha maior inspiração. Obrigado por estar sempre ao meu lado e acreditar que eu posso ser sempre uma pessoa melhor. O senhor faz muita falta aqui.

Agradeço minhas mães, Rozânia e Floricena, pelo amor incondicional, por todo carinho e cuidado, por sempre me apoiarem e darem conforto e incentivo com seus conselhos.

Aos meus irmãos Pamela, Nestor e Otávio, minha gratidão por fazerem parte da minha vida.

À minha sobrinha Antonela luz e alegria de toda família, que com seu sorriso inunda os dias de todos com alegria e felicidade. Você é o motivo pelo qual buscarei sempre ser o melhor exemplo e fazer do mundo um lugar melhor.

A toda minha família pelo apoio e por compreenderem minha ausência.

Ao meu amigo Thiago, por estar sempre ao meu lado, me incentivar e tornar essa jornada mais leve.

Aos professores Renato e Roberta pela orientação, apoio e por toda paciência durante meu processo de aprendizado. Sem vocês a concretização de mais essa etapa não seria possível.

À minha amiga e fiel escudeira Laila, por ser fundamental na realização desse sonho e de tudo que estou vivendo ao longo de toda essa jornada. Seus conselhos sempre foram fundamentais e hoje sou eternamente grato a você.

A todos meus amigos, distantes e presentes, que não couberam citados aqui, mas que estão sempre comigo no coração.

A todo corpo docente e servidores da UNIFEI pelos ensinamentos e atenção dada aos alunos. Aos meus colegas do grupo LogTrans por todas as risadas e experiências trocadas.

A UFSJ, que sempre esteve de portas abertas quando precisei desde quando ingressei em meu curso de graduação. Ao grupo TIMS, por me acolher, ajudar e me permitir contribuir em suas pesquisas, no que me foi possível.

Ao IF Sudeste MG- Campus Barbacena, por me acolher e reconhecer meu potencial, dando liberdade para realizar meu trabalho da melhor forma possível.

A todos os professores que passaram pelo meu caminho, pela generosidade e por serem fonte de inspiração.

E por fim, a todos que de alguma forma contribuíram para a realização desse sonho.

RESUMO

Eventos disruptivos têm o potencial de impactar profundamente a forma como as empresas gerenciam e operam suas cadeias de suprimentos. Esses eventos podem ser desencadeados por uma variedade de fatores, como: desastres naturais, pandemias, mudanças regulatórias, inovações tecnológicas ou interrupções geopolíticas. Seu acontecimento é inevitável e é fundamental que as empresas estejam preparadas para enfrentá-los. De particular interesse para esse trabalho está o comércio eletrônico e o impacto de suas entregas no Transporte Urbano de Cargas (TUC) durante e após eventos disruptivos. Nesse contexto, o uso de ferramentas que apoiem a tomada de decisão pode auxiliar na busca de soluções para mitigar os impactos decorrentes destes eventos, garantindo a resiliência das operações de transporte mesmo em momentos de turbulência. Durante um evento disruptivo, o volume de encomendas entregues pode aumentar consideravelmente, gerando uma demanda de entregas de comércio eletrônico que supera as expectativas. Isso impacta diretamente a atuação das transportadoras em ambiente urbano, que enfrentam um aumento expressivo na demanda de entregas. O objetivo desta tese é apresentar o DISRUPSIM: uma ferramenta de apoio à decisão para o transporte urbano de cargas do *e-commerce* durante eventos disruptivos. A ferramenta proposta funciona por meio de um modelo de simulação híbrida, combinando a Simulação à Eventos Discretos com a Simulação Baseada em Agentes, possibilitando a avaliação de iniciativas de *City logistics* para o TUC do *e-commerce* durante eventos disruptivos. Nesta tese, sua aplicação é demonstrada em um caso real: a partir dos dados fornecidos por uma transportadora, foram elaborados cenários comparativos para análise e modelagem da demanda de entregas. A construção dos cenários buscou modelar a demanda de entregas antes e depois de um evento disruptivo, considerando para isto o período de pandemia da COVID-19. Na aplicação, o uso de *Delivery Lockers* foi avaliado como uma iniciativa de *City logistics* para amenizar os impactos sobre as operações da transportadora. A ferramenta se mostrou versátil, podendo ser facilmente adotada por qualquer transportadora, bastando ajustar os parâmetros de entrada e a localização de acordo com as particularidades de sua operação local. Além disso, outras iniciativas de *City logistics* para o TUC do *e-commerce* também podem ser avaliadas adaptando-se os processos de modelagem e os dados de entrada do modelo, mitigando os impactos sobre as operações de entrega do *e-commerce*. Por meio dos resultados gerados por essa ferramenta, é possível realizar análises abrangentes, incluindo dados de quilometragem percorrida, distância total transportada, volume de carga movimentado, emissões de CO₂, consumo de combustível, número de viagens realizadas e ocupação dos veículos no momento da saída para efetuar as entregas. Além disso, a ferramenta permite a avaliação de indicadores de desempenho e da eficiência energética da transportadora. Em um cenário prático, no caso estudado, a ferramenta se mostrou altamente promissora, demonstrando um potencial de economia de energia de até 60% em termos de pedidos entregues e volume transportado. Esses resultados demonstraram a aplicabilidade da ferramenta para apoio a decisões e na avaliação de iniciativas destinadas ao TUC durante eventos disruptivos, auxiliando assim, na busca de soluções mais eficientes e sustentáveis no transporte de mercadorias em áreas urbanas.

Palavras-Chave: Transporte urbano de cargas, *e-commerce*, simulação, *City logistics*.

ABSTRACT

Disruptive events have the potential to deeply impact how companies manage and operate their supply chains. These events can be triggered by a variety of factors such as natural disasters, pandemics, regulatory changes, technological innovations, or geopolitical disruptions. Their occurrence is inevitable, and it is essential for companies to be prepared to face them. Of particular interest for this work is e-commerce and its impact on Urban Freight Transport (UFT) during and after disruptive events. In this context, the use of decision support tools can aid in seeking solutions to mitigate the impacts of these events, ensuring the resilience of transportation operations even in turbulent times. During a disruptive event, the volume of delivered orders can significantly increase, creating a demand for e-commerce deliveries that exceeds expectations. This directly impacts the operation of carriers in urban environments, facing a significant increase in delivery demand. The aim of this thesis is to present DISRUPSIM: a decision support tool for urban freight transport of e-commerce during disruptive events. The proposed tool operates through a hybrid simulation model, combining Discrete Event Simulation with Agent-Based Simulation, enabling the evaluation of City logistics initiatives for UFT of e-commerce during disruptive events. In this thesis, its application is demonstrated in a real case: scenarios were developed for comparative analysis and modeling of delivery demand based on data provided by a carrier. Scenario construction aimed to model delivery demand before and after a disruptive event, considering the COVID-19 pandemic period for this purpose. In the application, the use of Delivery Lockers was evaluated as a City logistics initiative to alleviate the impacts on carrier operations. The tool proved to be versatile, easily adoptable by any carrier, simply by adjusting input parameters and location according to the particularities of their local operation. Additionally, other City logistics initiatives for UFT of e-commerce can also be evaluated by adapting modeling processes and model input data, mitigating impacts on e-commerce delivery operations. Through the results generated by this tool, comprehensive analyses can be conducted, including data on distance traveled, total transported distance, cargo volume moved, CO2 emissions, fuel consumption, number of trips made, and vehicle occupancy at the time of departure for deliveries. Furthermore, the tool allows for the evaluation of performance indicators and the energy efficiency of the carrier. In a practical scenario, in the case studied, the tool showed great promise, demonstrating a potential energy savings of up to 60% in terms of orders delivered and volume transported. These results demonstrated the applicability of the tool for decision support and the evaluation of initiatives aimed at UFT during disruptive events, thus aiding in the search for more efficient and sustainable solutions in the transportation of goods in urban areas.

Key-words: Urban freight transportation, e-commerce, simulation, *City logistics*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Área de contribuição técnico-científica do estudo.....	19
Figura 2-Estrutura da Tese	22
Figura 3- Artigos Publicados por Ano.....	43
Figura 4- Tipo de Simulação	49
Figura 5- Classificação da pesquisa	52
Figura 6- Etapas do processo de modelagem e simulação.	54
Figura 7- Elementos e simbologia do IDEF-SIM.....	56
Figura 8- Modelo Conceitual (fluxo de operações genérico de uma transportadora)	57
Figura 9- Ambiente de trabalho do ALX.....	59
Figura 10- Passo a passo para aplicação do DISRUPSIM.	70
Figura 11 - Ambiente de simulação após entrada dos dados.....	71
Figura 12- Cenários Base	74
Figura 13- Localização dos DLs (até 2 km)	77
Figura 14- Localização dos DLs (até 3 km)	77
Figura 15- Grupos de cenários.....	81
Figura 16- Análises dos indicadores.....	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Classificação dos modelos de simulação	37
Tabela 2- Análise Bibliométrica.....	42
Tabela 3- Dados de entrada da simulação	62
Tabela 4- Análise do Número de Replicações.....	65
Tabela 5- Lista de tabelas utilizadas para modelagem no software	68
Tabela 6 - Parâmetros utilizados para a composição do DOE	75
Tabela 7- Matriz Experimental.....	78
Tabela 8 - Análise de Variância (ANOVA) das variáveis de saída.....	79
Tabela 9- Resultados da simulação	82
Tabela 10- Comparação dos cenários	85
Tabela 11- Ganhos obtidos em cada cenário simulado com a implantação dos DLs em relação aos cenários A, B, C e D.....	87
Tabela 12- Custo de energia	90
Tabela 13- Gráficos de interação e efeitos principais.....	117
Tabela 14- Lista de tabelas utilizadas para modelagem no software	119
Tabela 15- Lista de tabelas utilizadas para modelagem no software	121

LISTA DE ABREVIações

- ABCOMM- Associação Brasileira de Comércio Eletrônico
- ALX- Anylogistixs
- ANAC- Agência Nacional de Aviação Civil
- B2C- *Business-to-consumer*
- CCU- Centros de Consolidação Urbana
- CDP- *Collection and delivery Points*
- CS- Cadeia de Suprimentos
- DDPT- *Drone Delivery using Public Transport*
- DLs- *Delivery Lockers*
- DoE- *Design of Experiments*
- DS- Dinâmica de Sistemas
- FIFO- *First In First Out*
- GEE- Gases de Efeito Estufa
- GFA- *Greenfield Analysis*
- ITS- *Intelligent Transportation Systems*
- NO- *Network Optimization*
- OCDE- Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
- OMS- Organização Mundial da Saúde
- SBA- Simulação Baseada em Agentes
- SED- Simulação a Eventos Discretos
- SH- Simulação Híbrida
- SIM- *Simulation*
- TO- *Transportation Optimization*
- TUC- Transporte Urbano de Cargas
- VUC- Veículo Urbano de Carga

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1 Objetivo geral	17
1.2 Objetivos específicos	18
1.3 Contribuição científica	18
1.4 Justificativa.....	20
1.5 Estrutura da tese	22
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1 Logística urbana	23
2.2 Transporte urbano de cargas durante eventos disruptivos.....	28
2.3 Desafios e iniciativas de <i>City logistics</i> para o <i>e-commerce</i>	32
2.4 Modelagem e simulação	36
2.5 Simulação híbrida.....	40
2.6 Revisão sistemática da literatura	41
2.6.1 Evolução das pesquisas	43
2.6.2 Temas das pesquisas.....	45
2.6.3 Tipologia da simulação.....	48
2.6.4 Ineditismo da tese	50
3 MÉTODODE PESQUISA	51
3.1 Classificação da pesquisa	51
3.2 Etapas de desenvolvimento do DISRUPSIM	52
3.3 Etapas de modelagem e simulação	53
3.4 Concepção	54
3.4.1 Objetivos e definição do sistema.....	55
3.4.2 Construção do modelo conceitual	55
3.4.3 Validação do modelo conceitual	57
3.4.4 Construção do Modelo de Simulação.....	58
3.4.5 Verificação e Validação do Modelo de Simulação	64
3.4.6 Análise de indicadores e custos	66
3.5 Resumo das etapas para aplicação da ferramenta.....	67
4 APLICAÇÃO.....	71
4.1 Análise de Sensibilidade.....	74
4.2 Elaboração dos cenários comparativos.....	79

4.3	Resultados dos cenários base.....	82
4.4	Resultados da implantação dos DLs.....	84
4.4.1	Análise de indicadores e custos.....	88
5	DISCUSSÕES.....	92
6	CONCLUSÕES.....	96
6.1	Limitações e sugestões para trabalhos futuros.....	100
	REFERÊNCIAS.....	102
	APÊNDICE A.....	116
	APÊNDICE B.....	118
	APÊNDICE C.....	120

1. INTRODUÇÃO

O transporte urbano de cargas (TUC) do *e-commerce* tem vivenciado um crescimento expressivo nos últimos anos. À medida que as cidades crescem em população e atividade econômica, a demanda por entrega de mercadorias dentro dos centros urbanos aumenta em larga escala (ALVES *et al.*, 2023; VIU-ROIG e ALVAREZ-PALAU, 2020). Além disso, o comércio eletrônico e a mudança nos hábitos de consumo, com consumidores buscando conveniência e rapidez na entrega de produtos, têm contribuído significativamente para esse crescimento (BULDEO RAI *et al.*, 2022). Como resultado, o TUC associado ao *e-commerce* tornou-se um componente vital da logística nas cidades.

Entretanto, esse aumento na atividade de transporte de cargas em áreas urbanas tem enfrentado alguns desafios (MOHAMMAD *et al.*, 2023). O congestionamento nas vias urbanas é um dos principais obstáculos enfrentados pelos operadores de transporte, resultando em atrasos nas entregas, aumento nos custos operacionais e impactos ambientais negativos devido às emissões de gases de efeito estufa (MILESWKI *et al.*, 2021). Além disso, a infraestrutura inadequada, a falta de áreas de carga e descarga adequadas e as restrições de acesso em certas áreas urbanas também representam desafios significativos para o transporte de cargas nas cidades (LABEGALINI *et al.*, 2021; SILVA *et al.*, 2020).

O surgimento de eventos disruptivos, como pandemias, desastres naturais e mudanças geopolíticas, também tem demonstrado o potencial de desafiar a resiliência e a eficácia das operações do TUC do *e-commerce* (HOLGUIN-VERAS *et al.*, 2023). De acordo com Ivanov (2021), os eventos disruptivos podem interromper as operações de transporte, causar atrasos nas entregas, aumentar os custos operacionais e destacar ainda mais a importância da adaptação dos sistemas de transporte urbano de cargas. Além disso, estes eventos podem levar a mudanças no comportamento do consumidor, com mais pessoas optando por comprar *online* em vez de em lojas físicas, como durante a pandemia de COVID-19, por exemplo. Isso, por sua vez, leva ao aumento da demanda de entregas e ao agravamento dos problemas do TUC do *e-commerce* (HOLGUIN-VERAS *et al.*, 2023).

Uma pesquisa do *McKinsey & Company*, (2020) afirma que esses eventos podem ocorrer em média a cada 3,7 anos, podendo ter um mês ou mais de duração. Em alguns casos, essa duração pode superar a expectativa dos especialistas, como foi o caso da COVID-19, que teve seu início ao final de 2019 e seu término em maio de 2023, quando a Organização Mundial da Saúde (OMS) declarou o fim da emergência global. Os riscos e impactos impostos às operações logísticas durante estes períodos dependem de sua duração e proporção e podem causar

impactos significativos nas operações de transporte. Nesse contexto, é imperativo implementar novos métodos e técnicas para auxiliar no planejamento e avaliar os impactos nas operações de transporte durante essas situações (RAHMAN *et al.*, 2021).

De acordo com Abudurehman e Nilupaer (2021), a falta de ferramentas que auxiliem o planejamento do TUC, aliada ao inesperado crescimento das entregas individuais, agrava ainda mais os problemas enfrentados pelo TUC do *e-commerce*. Ivanov (2020) corrobora essas afirmações ao relatar que os tomadores de decisão e planejadores de transporte devem criar planos robustos, dinâmicos e oportunos para mitigar os impactos causados por estas situações imprevisíveis, visando atender ao aumento da demanda de entregas de forma eficiente e eficaz. A literatura sobre o TUC do *e-commerce* concentra-se majoritariamente na proposição de iniciativas de *City logistics* e na roteirização de entregas, enquanto poucas pesquisas buscam entender ou propor ferramentas de apoio à decisão, que auxiliem na compreensão dos impactos do aumento da demanda nas entregas para o TUC do *e-commerce* durante eventos disruptivos (RAHMAN *et al.*, 2021). Durante a revisão sistemática da literatura sobre os principais temas, com a finalidade de subsidiar a contribuição científica e prática da tese desenvolvida observou-se que a literatura ainda é incipiente e mais estudos são necessários para entender e mensurar esses impactos, sendo poucos os estudos que exploram ou mencionam o tema (MAVI *et al.*, 2022; SAKAI *et al.*, 2022; BUDEL RAI *et al.*, 2022; MILEWSKI *et al.*, 2021; STRAUBINGER *et al.*, 2023).

Durante eventos disruptivos, as operações do TUC do *e-commerce* enfrentam desafios únicos que podem afetar sua eficiência, segurança e sustentabilidade (MILEWSKI *et al.*, 2021). A crise global desencadeada pela pandemia de Coronavírus evidenciou a imprevisibilidade e o impacto devastador desses eventos em diversos sistemas socioeconômicos, incluindo o TUC (BATTY, 2020). O impacto econômico e social massivo da pandemia levou muitos a questionarem a eficácia dos modelos de previsão tradicionais. A crescente complexidade das cidades e das sociedades modernas, impulsionada pelo avanço tecnológico, amplia ainda mais os desafios de antecipar e gerenciar crises (IVANOV, 2020). A imprevisibilidade emerge como a norma, exigindo uma abordagem adaptativa e dinâmica para lidar com o futuro. Cada vez mais a ciência é utilizada para informar as políticas através de modelos e ferramentas, entretanto a modelagem de eventos disruptivos não é geralmente considerada problemática em diversos estudos (BATTY, 2020). É essencial reconhecer essa mudança de paradigma e desenvolver estratégias inovadoras que nos permitam enfrentar os desafios de maneira eficaz e resiliente.

Nesses momentos, é fundamental adotar abordagens inovadoras que possam auxiliar na tomada de decisões ágeis e estratégicas para mitigar os impactos adversos. A modelagem e simulação destacam-se como uma ferramenta em potencial nesse contexto (IVANOV, 2021). Ela pode ser utilizada para otimizar rotas de entrega, alocar recursos de forma eficiente, para tomada de decisão em tempo real, avaliar impactos de políticas de transporte e gerenciar crises. Possibilitando assim, uma análise abrangente e uma melhora na resiliência das operações do TUC. Ao oferecer a possibilidade de combinar diferentes abordagens e técnicas de modelagem e simulação em metodologias híbridas, permitem a representação precisa e detalhada das operações de entrega do *e-commerce*. Levam em consideração variáveis dinâmicas e inter-relacionadas, como a demanda flutuante, as restrições de tráfego, as rotas de entrega e as condições ambientais (DE LA TORRE *et al.*, 2021).

No contexto atual, em que a sustentabilidade é uma preocupação global crescente, o uso de modelagem e simulação emergem como uma abordagem promissora para promover práticas mais eficientes e ambientalmente responsáveis no TUC do *e-commerce* (DOLGUI *et al.*, 2020). Seu uso oferece uma série de vantagens para o TUC do *e-commerce* incluindo redução de custos, melhoria da eficiência operacional, planejamento estratégico e avaliação de políticas, contribuindo para operações mais eficientes, sustentáveis e resilientes (DE A TORRE *et al.*, 2023). Isso pode incluir simulações de fluxo de tráfego, impactos ambientais, custos operacionais e logística de entrega (AKTAS *et al.*, 2020; ALVES *et al.*, 2023; GONZÁLEZ-VARONA *et al.*, 2020). Além disso, pode ser utilizada para prever o impacto de mudanças futuras, como o crescimento de compras online pela população, mudanças comportamentais, ou a introdução de novas iniciativas de *City logistics*, como veículos autônomos, *Delivery Lockers* (DLs) ou drones de entrega (BUDEO RAI *et al.*, 2022; KHALID E CHANKOV, 2022; SAWIK *et al.*, 2022).

Dentre as iniciativas de *City logistics* estudadas para o TUC do *e-commerce*, a consolidação de entregas na última milha (Calabrò *et al.*, 2022), pontos de coleta/zonas de entrega (ALVES *et al.*, 2022; 2023; SAWIK *et al.*, 2022), bicicletas de carga (GONZALEZ-CALDERON *et al.*, 2022), drones e robôs de entrega (BUDEO RAI *et al.*, 2022; KHALID E CHANKOV, 2022) foram propostas e discutidas. O uso DLs têm ganhado destaque na literatura e tem apresentado ganhos significativos para operações de transporte, incluindo flexibilidade de entrega, redução de custos, aumento da eficiência operacional e conveniência para os consumidores (ALVES *et al.*, 2023).

Um DL (ou armário de entrega) é uma estrutura física instalada em locais públicos ou privados, como edifícios residenciais, escritórios, estações de transporte público ou supermercados, projetada para armazenar temporariamente encomendas e pacotes entregues por serviços de courier ou empresas de comércio eletrônico (ALVES *et al.*, 2023). Esses armários geralmente são acessíveis através de códigos ou aplicativos móveis exclusivos para cada destinatário, permitindo que as pessoas colem suas encomendas em horários convenientes para elas, sem a necessidade de estar presente no local durante a entrega (SOUSA *et al.*, 2021). São uma solução conveniente para problemas relacionados à segurança e à conveniência das entregas, especialmente em áreas urbanas densamente povoadas. Entretanto, sua aplicação necessita ser mais bem explorada no contexto brasileiro. Embora alguns estudos tenham buscado estudar o tema em cidades do Brasil (OLIVEIRA *et al.*, 2019; ALVES *et al.*, 2019; ALVES *et al.*, 2022; MASTEGUIM e CUNHA, 2022), sua aplicação prática ainda é pouco explorada.

Ao fornecer uma plataforma para experimentação virtual, a simulação permite que os tomadores de decisão mensurem e testem diferentes iniciativas antes de implementá-las no mundo real, reduzindo assim os riscos e custos associados a decisões tomadas sem informações adequadas (IVANOV, 2021). Portanto, podem constituir uma ferramenta valiosa para ajudar as empresas e autoridades a enfrentar os desafios do TUC durante eventos disruptivos, permitindo uma melhor gestão de suas operações, mensurando os impactos sobre a quilometragem percorrida, gastos com combustível, emissão de poluentes, número de viagens e capacidade de carga das transportadoras e a avaliação de estratégias de mitigação de riscos (HOLGUIN-VERAS *et al.*, 2023).

Nesse contexto, considerando as lacunas expostas acima, esse trabalho se propõe a investigar as seguintes questões de pesquisa:

1. Como a modelagem e simulação podem ser utilizadas como ferramenta de apoio à decisão e para a avaliação de iniciativas de *City logistics* pelas transportadoras do *e-commerce* durante eventos disruptivos?
2. Como a utilização de ferramentas de apoio a decisão pode auxiliar na promoção da resiliência das operações de entrega do *e-commerce* durante esses eventos?

Este trabalho busca contribuir para o preenchimento das lacunas evidenciadas na literatura por meio do DISRUPSIM, uma ferramenta de apoio à decisão que possibilita a avaliação de iniciativas de *City logistics* para o TUC do *e-commerce* e que tem como base um

modelo de Simulação Híbrida (SH), combinando a Simulação à Eventos Discretos com a Simulação Baseada em Agentes. Seu enfoque principal é medir o impacto do aumento da demanda nas operações de entrega do comércio eletrônico durante eventos disruptivos, realizar análises comparativas e propor melhorias. Seu objetivo é aprimorar o planejamento das operações, oferecendo uma ferramenta que permita compreender os efeitos do aumento na demanda de entregas nas operações de transporte do comércio eletrônico. Permite, assim, que as transportadoras: 1) reduzam os impactos negativos de um evento disruptivo sobre as operações de entrega; e, 2) atendam a demanda e retornem a um novo estado de normalidade, sem custos ou investimentos que poderão se tornar obsoletos no futuro.

O uso da modelagem e simulação é justificado pelo grande número de variáveis, que devem ser estudadas de maneira conjunta e sistêmica, avaliando as influências delas entre si. Enquanto a SED é usada para capturar a aleatoriedade e a interdependência de eventos discretos nas operações do TUC, a SBA destaca o comportamento autônomo e interativo dos agentes individuais dentro desse sistema, permitindo uma análise mais detalhada das operações e dos comportamentos resultantes das interações.

Os cenários simulados buscarão reproduzir o contexto vivenciado pelas transportadoras do *e-commerce* durante um evento disruptivo e, a partir de uma análise comparativa, evidenciar os ganhos obtidos por meio do uso de DLs. A escolha dessa iniciativa, deve-se aos ganhos significativos para operações de transporte apresentados na literatura (OLIVEIRA *et al.*, 2019; ALVES *et al.*, 2019; ALVES *et al.*, 2022; MASTEGUIM e CUNHA, 2022) e à necessidade de sua exploração de sua aplicação prática no contexto brasileiro.

Como resultado, espera-se que esse estudo forneça uma ferramenta de apoio à decisão para operações de entrega do comércio eletrônico durante eventos disruptivos. Espera-se, ainda, contribuir com a literatura sobre o TUC do *e-commerce*, também pela ótica das transportadoras, que são diretamente afetadas pelo aumento da demanda de entregas e pelos desafios advindos do crescimento do *e-commerce* nos últimos anos.

1.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo desenvolver uma ferramenta de apoio à decisão para promoção de resiliência para o do transporte urbano de cargas do *e-commerce* durante a ocorrência de eventos disruptivos.

1.2 Objetivos específicos

- Desenvolver uma ferramenta de apoio à decisão que mensure os impactos sobre a quilometragem percorrida, gastos com combustível, emissão de poluentes, número de viagens e capacidade de carga das transportadoras;
- Realizar uma aplicação em um caso real com dados fornecidos por uma transportadora, para validação da ferramenta;
- Testar cenários considerando uma iniciativa de *City logistics*, os *Delivery Lockers*, em virtude do aumento significativo de estudos sobre essa iniciativa nos últimos anos e dos ganhos para operações de entrega do *e-commerce*;
- Realizar análises de indicadores de custos por metro cúbico transportado, quilograma de CO₂ emitido, quilometro rodado, pedido entregue e dos custos de energia, analisando os ganhos para operação em cada cenário simulado;
- Disponibilizar uma ferramenta de apoio à decisão para o atendimento da demanda durante eventos disruptivos para as transportadoras e *Stakeholders* envolvidos no TUC do *e-commerce*.

1.3 Contribuição científica

Este estudo busca contribuir cientificamente em três campos de pesquisa. Primeiramente, consiste em apresentar uma análise teórica sobre o estado da arte dos três temas abordados: logística urbana, transporte urbano de cargas (TUC) do *e-commerce* durante eventos disruptivos e a resiliência de sistemas logísticos urbanos. Ao longo dessa discussão, algumas lacunas teóricas serão evidenciadas. Partindo-se dessas lacunas, o DISRUPSIM uma ferramenta de apoio à decisão para promoção de resiliência das operações de transporte durante eventos disruptivos, será desenvolvida.

É importante destacar que, embora haja uma extensa literatura sobre o TUC, este trabalho se concentra, especificamente, na exploração de como uma ferramenta baseada em modelagem e simulação híbrida pode ser aplicada para apoiar a tomada de decisão nas operações de entrega do comércio eletrônico. São discutidas as iniciativas estudadas até o momento e como tais abordagens podem beneficiar as empresas de transporte diante de situações de aumento repentino da demanda. A Figura 1 apresenta as áreas nas quais o presente estudo pretende contribuir técnica e cientificamente.

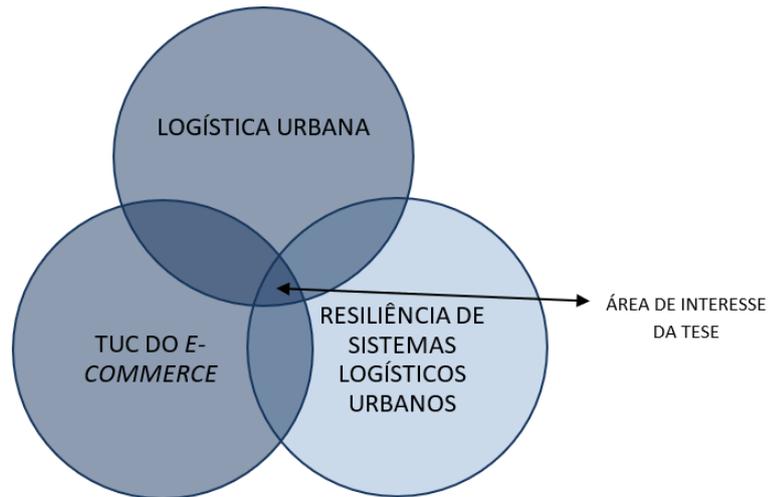


Figura 1- Área de contribuição técnico-científica do estudo

Por meio de uma revisão sistemática da literatura realizada durante este trabalho observou-se uma lacuna de pesquisa sobre os impactos de eventos disruptivos nas operações de entrega do comércio eletrônico. Poucos estudos foram realizados utilizando abordagens de modelagem de simulação para compreender e mitigar os impactos desses eventos no TUC do *e-commerce* (MAVI *et al.*, 2022; SAKAI *et al.*, 2022; BUDEL RAI *et al.*, 2022; MILEWSKI *et al.*, 2021; STRAUBINGER *et al.*, 2023). Essa lacuna inclui a ausência de ferramentas de apoio à decisão que permitam um melhor planejamento e compreensão dessas operações, considerando situações inesperadas de aumento da demanda e a redução da capacidade das operações de transporte.

Portanto, é oportuno e relevante estudar e avaliar ferramentas de apoio à decisão que possam facilitar um planejamento mais eficiente e a formulação de estratégias para mitigar os impactos gerados para as transportadoras do *e-commerce* visando a promoção da resiliência das operações. Isso permitirá que os prestadores de serviços de transporte se preparem adequadamente para atender à demanda de entregas durante eventos disruptivos. Uma análise dos resultados gerados por meio de um modelo de simulação poderá fornecer informações cruciais para entender os impactos causados pelo aumento da demanda de entregas nessas situações, bem como demonstrar como algumas iniciativas podem aprimorar as operações de entrega para atender a essa demanda. Essas contribuições não apenas enriquecem a literatura sobre o tema, mas também fornecem *insights* valiosos para o planejamento do TUC do *e-commerce* por parte das transportadoras e *stakeholders* envolvidos.

1.4 Justificativa

No contexto apresentado, é possível observar a relevância de se estudar ferramentas de apoio à decisão para o TUC do *e-commerce* durante eventos disruptivos, por se tratar de um setor que é diretamente impactado pelo aumento da demanda de entregas em domicílio. Ivanov (2020), em seu estudo, sugere que os tomadores de decisão e planejadores se esforcem para criar planos mais robustos, dinâmicos e oportunos que apresentem formas de mitigar os impactos causados por esses eventos em toda cadeia de suprimentos, como foi o caso da pandemia de COVID-19. Nas últimas duas décadas, a OMS relatou mais de 1400 epidemias, que apresentaram o potencial de impactar as Cadeias de Suprimentos (CS) globais (RAHMAN *et al.*, 2021). A epidemia de Ebola na África Ocidental em 2014-2016 foi responsável por gerar um impacto significativo na produção, distribuição e disponibilidade de suprimentos médicos e outros produtos essenciais (CLAY *et al.*, 2018). O surgimento da SARS em 2002 na China, o tsunami no Japão em 2011, o surto de Síndrome Respiratória no Oriente Médio em 2012 e epidemias, como o Ebola em 2014, são exemplos de eventos disruptivos que influenciaram as CS globais (GOVINDAN *et al.*, 2020; IVANOV, 2020; RAHMAN *et al.*, 2021). A recente pandemia do COVID-19 impactou as CS de empresas por todo o mundo e sua gravidade foi maior do que se previa (LAMBERT, 2020; GONZÁLEZ *et al.*, 2023).

Pelos motivos mencionados, é crescente o interesse empresarial e acadêmico por assuntos relacionados ao tema. Esses estudos são importantes, pois, conforme alertado em diversos outros (AKTAS *et al.*, 2020; MARCUCCI *et al.*, 2021; MELKONYAN *et al.*, 2020; SERRANO-HERNANDEZ *et al.*, 2021), a não compreensão e a superestimação da demanda no planejamento das operações de transporte durante eventos disruptivos podem agravar os problemas do TUC do *e-commerce* (HOLGUÍN-VERAS *et al.*, 2023). Isso, por sua vez, pode resultar em investimentos adicionais para atender ao aumento da demanda de entregas durante esses períodos e do não aproveitamento da capacidade ociosa das operações por parte das transportadoras. Consequentemente, a aquisição de novos veículos e a contratação de mão de obra, por exemplo, poderão se tornar desnecessários após o fim dos eventos disruptivos (SILVA *et al.*, 2021; SOUSA *et al.*, 2022).

A falta de planejamento das operações de entrega do *e-commerce* durante eventos disruptivos pode tornar a operação menos eficiente, ocasionando: custos operacionais mais altos, aumento das emissões de CO₂, aumento do congestionamento nas áreas urbanas, aumento de reentregas, entre outros problemas (ALVES *et al.*, 2019; GONZÁLEZ-VARONA *et al.*, 2020; HOLGUÍN-VERAS *et al.*, 2021; MUÑOZ-VILLAMIZAR *et al.*, 2021; VIU-ROIG e

ALVAREZ-PALAU, 2020; ALVES *et al.*, 2023). Alguns estudos discutem e até sugerem algumas iniciativas para amenizar os problemas gerados. Por exemplo, Mavi *et al.* (2022) analisam o papel do transporte e o impacto das inovações de transporte durante um contexto pandêmico. Sakai *et al.* (2022) propõe uma estrutura teórica de modelagem de demanda em períodos pré e pós pandemia da COVID-19, considerando diferentes modos de entrega. Milewski *et al.* (2021) realizam uma comparação do gasto com combustível entre as entregas realizadas em domicílio e em pontos de auto coleta, considerando a demanda de entregas durante a pandemia da COVID-19. Straubinger *et al.* (2023) exploram o impacto do comércio eletrônico e da entrega por drones nas cidades, considerando o crescimento do comércio eletrônico pós-pandemia da COVID-19. Entretanto, embora os estudos mencionados sejam de grande contribuição para a base conceitual deste trabalho, nenhum deles explora a modelagem e simulação como uma ferramenta de apoio à decisão para avaliar os impactos da alteração da demanda durante eventos disruptivos. A maioria dos estudos busca otimizar medidas de impacto ambiental (por exemplo, emissões de gases de efeito estufa, distância, consumo de combustível, carga de veículos, poluição, quilômetro vazio) e/ou medidas econômicas (por exemplo, custo e lucro). Poucos estudos buscam otimizar o impacto social (por exemplo, acessibilidade, confiabilidade, saúde e segurança, congestionamento) em períodos de normalidade da demanda. As decisões típicas incluem o uso de transportes mais sustentáveis, otimização dos custos e do tempo de entrega, roteirização, terceirização das entregas por meio de logística colaborativa e sistemas híbridos de transporte. Utilizando para isso, ferramentas e métodos que fornecem uma decisão pontual, ou seja, programada e estática, não representando, muitas vezes, o dinamismo que acontece na realidade. Observa-se também a falta de validação e/ou aplicação dos modelos desenvolvidos com dados reais.

Aliado a esses fatores, a complexidade dos sistemas logísticos tem aumentado a dificuldade de modelar a realidade, exigindo aplicação de ferramentas que sejam capazes de analisar simultaneamente os aspectos ambientais, sociais e econômicos, de modo a contribuir para melhorar a sustentabilidade desses sistemas (HOLGUÍN-VERAS *et al.*, 2023). Nesse contexto, a utilização de metodologias híbridas com foco em sistemas logísticos, permite uma melhor representação da realidade para a análise e apoio à decisão, considerando aspectos estratégicos, táticos e operacionais (IVANOV, 2021). Além disso, o uso de abordagens de simulação combinadas possibilita extrair as vantagens de cada uma e pode reduzir o alto grau de complexidade do modelo simulado e o tempo computacional relativamente grande para se executar um novo cenário (ALVES *et al.*, 2023).

Dessa forma, a busca por ferramentas de apoio à decisão para sistemas logísticos, juntamente com a possibilidade de utilizar uma abordagem híbrida de simulação, levou ao desenvolvimento da ferramenta que será apresentada neste trabalho: o DISRUPSIM. O DISRUPSIM busca contribuir com a logística urbana, buscando representar as operações das transportadoras durante eventos disruptivos, para viabilizar análises comparativas e mensurar os impactos e custos gerados. Além disso, busca demonstrar como o uso de iniciativas de *City logistics* pode contribuir amenizar os impactos gerados.

1.5 Estrutura da tese

Além deste capítulo de introdução, a tese ainda contém outros 5 capítulos. No capítulo 2, é apresentada a revisão da literatura que suporta a pesquisa realizada. Também é apresentada uma revisão sistemática da literatura sobre os principais temas, com a finalidade de subsidiar a contribuição científica e prática da tese desenvolvida. No capítulo 3, encontra-se classificação da pesquisa bem como o método para desenvolvimento do DISRUPSIM. O capítulo 4 analisa os resultados obtidos com a aplicação da ferramenta. O capítulo 5 traz as conclusões e as principais limitações do trabalho, bem como sugestões para trabalhos futuros. A estrutura da tese está representada na Figura 2. Realizou-se uma revisão abrangente da literatura relacionada ao transporte urbano de cargas do *e-commerce*, resiliência, eventos disruptivos, modelagem e simulação. Isso auxiliou a situar o estudo dentro do contexto existente e a identificar lacunas no conhecimento.

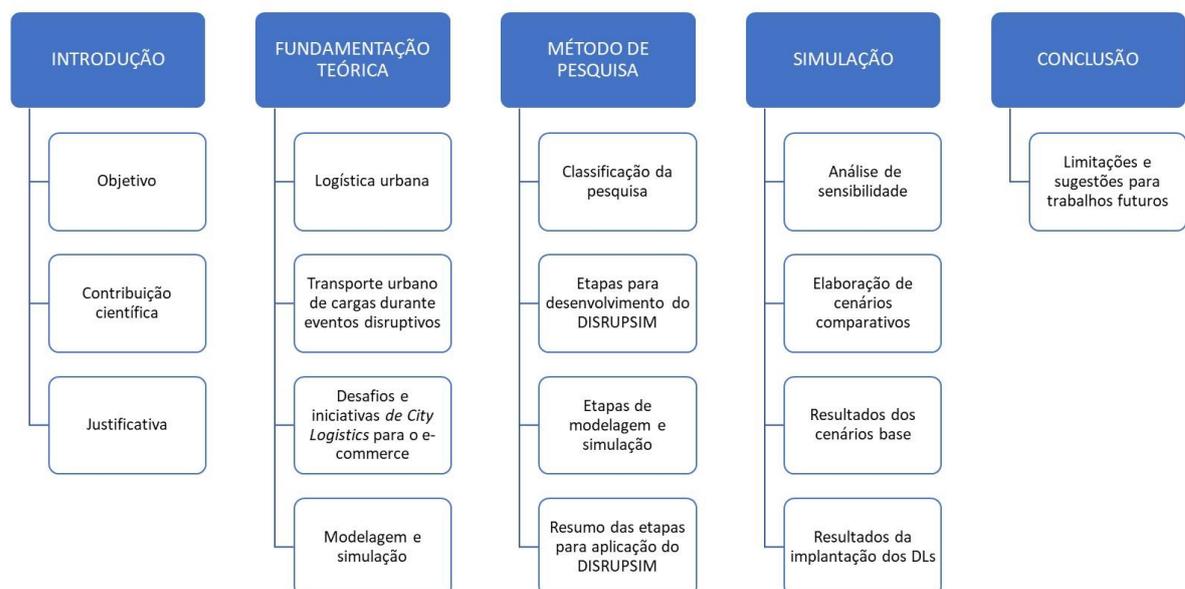


Figura 2-Estrutura da Tese

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta o estado da arte que fundamenta esta tese. Os principais temas foram investigados e expostos para contextualizar tanto o objeto de estudo quanto a ferramenta empregada. Foram utilizados artigos científicos disponíveis em renomados bancos de dados acadêmicos, dissertações, teses e trabalhos apresentados em conferências. Dada a natureza do tema, também foram examinados relatórios sobre o crescimento do comércio eletrônico, bem como legislações e políticas públicas que influenciam diretamente na compreensão do TUC do comércio eletrônico. Na seção final deste capítulo, uma revisão sistemática da literatura é apresentada para reforçar a importância dos temas abordados e a escolha do objeto de estudo desta tese.

2.1 Logística urbana

A mobilidade urbana tornou-se um dos principais desafios das cidades nas últimas décadas. Centros urbanos tem vivenciado um elevado grau de urbanização, que vem ocorrendo, na maioria das vezes, sem um planejamento territorial e urbanístico adequado (VIANA, 2016) e afetam tanto a circulação de pessoas, como de mercadorias e serviços. Além desse fator, há também uma carência de políticas públicas eficazes que promovam o desenvolvimento urbano, integrando os diversos modos de transporte para aprimorar a acessibilidade e a mobilidade nas áreas urbanas (ALVES *et al.*, 2019; OLIVEIRA *et al.*, 2018). Esse contexto tem levado à utilização da infraestrutura de transporte próxima de sua capacidade máxima e tem modificado os padrões de deslocamento nas regiões urbanas.

Atualmente, segundo dados mais recentes da Organização das Nações Unidas (ONU) em 2021, cerca de 56% da população mundial vive em áreas urbanas. A projeção é de que esse valor aumente para aproximadamente 68% até 2050. De acordo com os dados mais recentes do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) de 2020, aproximadamente 86,1% da população brasileira vive em áreas urbanas, com estimativa de crescimento para 91,1% até 2030. A falta de planejamento, em conjunto com a grande concentração da população nas áreas urbanas, juntamente aos novos meios de consumo, como o *e-commerce*, tem aumentado a demanda pelo TUC, uma vez que esta atividade é essencial para satisfazer as necessidades da população (NUZZOLO E COMI, 2014). Estando diretamente relacionado ao abastecimento urbano, a mobilidade e ao desempenho e competitividade dos setores econômicos de uma cidade.

Dablanc (2007) define o TUC como um conjunto de fluxos contínuos que entram, atravessam e deixam as áreas urbanas. Segundo Silva (2021), o TUC não é um objetivo em si mesmo, mas sim um reflexo de um processo econômico global, nacional e local. Esse reflexo tem impactos diretos na eficiência e na competitividade das empresas situadas em áreas urbanas, devendo ser um componente essencial do planejamento urbano. Sua otimização é crucial para um crescimento econômico sustentável (CRAINIC *et al.*, 2015). Oliveira *et al.* (2017) enumeram diversas razões que destacam a importância dos estudos dedicados a esse tema:

1. Manutenção do estilo de vida atual nas áreas urbanas;
2. Influência sobre os preços dos produtos consumidos pela população;
3. Impacto direto na economia;
4. Sustentação das atividades e da competitividade dos setores industrial e comercial e;
5. Controle dos impactos ambientais.

De acordo com Lessa (2015), o crescimento da população concentrada em áreas urbanas, junto com o aumento na produção e consumo de bens, tem impulsionado a expansão econômica em várias regiões e gerado uma demanda crescente pelo TUC. As pessoas dependem de bens e serviços oferecidos pelo comércio, os quais são abastecidos pelo TUC. A falta desses bens pode perturbar significativamente as rotinas urbanas, desequilibrando as relações sociais e econômicas existentes (OLIVEIRA *et al.*, 2019), o que pode resultar em perdas econômicas para as cidades. Além disso, o setor de TUC é uma fonte importante de empregos (ALVES *et al.*, 2023).

No entanto, apesar de sua importância, o transporte de cargas raramente é considerado nos planos de mobilidade urbana, que geralmente se concentram no transporte de passageiros (LABEGALINI, 2020). A legislação brasileira em todas as esferas (federal, estadual e municipal) é inadequada quanto à regulamentação do TUC, tratando-o apenas como um assunto secundário em relação ao transporte urbano sempre que mencionado. Silva (2019) examinou e discutiu as principais legislações brasileiras em nível municipal, estadual e federal que consideram o TUC, evidenciando a falta de regulamentação e políticas públicas em todas as esferas do governo.

Com o crescimento do *e-commerce*, esse cenário tende a mudar, uma vez que os tempos de entregas vem diminuindo e o número de veículos vem aumentando de forma rápida ao longo

dos anos (ALVES *et al.*, 2023). Como consequência, as externalidades negativas gerados sobre o ambiente urbano também estão crescendo em um ritmo acelerado. Observa-se o aumento da consciência da população em relação aos temas que impactam a qualidade de vida urbana, resultando cobranças junto às autoridades, rumo a um movimento favorável para a solução destes problemas (SILVA *et al.*, 2020).

Para Alho e Silva (2017) o aumento da da população em áreas urbanas aliado ao crescimento do *e-commerce*, aumentou a quantidade de veículos circulando nos centros urbanos gerando uma demanda crescente por serviços de transporte. Nesse sentido, as compras online estão aumentando rapidamente os fluxos de carga que transitam nas áreas urbanas. De acordo com Perboli *et al.* (2018), enquanto o segmento *business-to-consumer* (B2C) representa cerca de 30% do faturamento do *e-commerce*, ele corresponde a 56% de suas remessas de entrega. Além disso, o comércio eletrônico envolve encomendas individualmente fragmentadas e urgentes de itens, geralmente, de pequena dimensão, conduzindo a mais tráfego nas áreas urbanas e a externalidades negativas como: a alta emissão de poluentes, congestionamentos, falta de vagas de estacionamento, acidentes, estacionamento irregular, dentre outros (ALVES *et al.*, 2022).

Esses efeitos negativos, em conjunto com o aumento populacional em áreas urbanas, têm forçado cada vez mais os planejadores de transporte e autoridades a enfrentar o desafio de promover a mobilidade urbana de forma mais sustentável, minimizando os impactos ambientais associados ao transporte, as emissões de gases de efeito estufa (GEE), os efeitos negativos sobre a economia e a qualidade de vida (HOLGUÍN-VERAS *et al.*, 2023). Em resposta, as empresas de logística do comércio eletrônico estão trabalhando para atender a demanda crescente do TUC em um ritmo mais rápido, com a ajuda de tecnologias emergentes e o gerenciamento operacional eficaz (PERBOLI *et al.*, 2018).

Ghaderi *et al.* (2022) afirmam que o TUC é um campo de pesquisa altamente relevante para o esgotamento dos recursos naturais e poluição ambiental, pois é responsável por quase um quarto do uso global de energia primária e das emissões de gases de efeito estufa (GEE). O aumento do número de veículos de carga circulando consome mais combustível e emite mais GEE a cada ano (CESTESB, 2021). O setor de transporte é responsável por aproximadamente 25% das emissões de CO₂, globalmente. O transporte terrestre é responsável por três quartos do total dessas emissões. Uma estimativa de 30% vem de veículos que transportam mercadorias (PERBOLI *et al.*, 2018). Portanto, encontrar soluções eficazes para mitigar a pressão da

logística de última milha imposta pelo *e-commerce* representa uma contribuição significativa para a sustentabilidade e sistemas de transportes mais eficientes.

De acordo com Labegalini (2020), o crescente destaque dado às questões ambientais e sociais, juntamente com o aumento do comércio eletrônico nas últimas décadas, acrescenta uma nova camada aos desafios enfrentados pelas cidades em relação à expansão do tráfego urbano. Esses desafios destacam a necessidade de regulamentação, controle e compreensão dos movimentos dos veículos de carga em áreas urbanas (SILVA, 2019). As comunidades locais têm, cada vez mais, demandado ações e políticas públicas nessa direção. Em resposta a essas demandas, tem surgido o conceito de *City logistics*, com o objetivo de desenvolver e implementar soluções sistêmicas e eficazes para os problemas do TUC.

Em 2001, Taniguchi definiu o *City logistics* como um processo de otimização das atividades de distribuição de mercadorias, realizado por entidades públicas e privadas em áreas urbanas, levando em conta fatores como congestionamento, tráfego e consumo de energia, dentro de uma estrutura de mercado. Thompson (2003) complementou essa definição, afirmando que o *City logistics* é um processo de planejamento integrado para a distribuição de carga urbana, baseado em um sistema de aproximações (integrações), que promove esquemas inovadores para reduzir o custo total (incluindo custos econômicos, sociais e ambientais) dos movimentos de carga dentro das cidades. Seus projetos permitem a elaboração de uma estrutura para planejadores urbanos, onde a busca por soluções para os problemas do TUC, geralmente, envolve o estabelecimento de parcerias entre os setores público e privado (DUTRA, 2004).

Benjelloun e Crainic (2009) afirmam que o *City logistics* aborda aspectos que vão além do escopo da logística urbana tradicional. Trata-se, portanto, de uma metodologia integrada ao TUC, que promove métodos inovadores para mitigar os problemas enfrentados por essas operações. O conceito é reconhecido pela Comissão Europeia como uma área na qual podem ser obtidos ganhos ambientais e de competitividade significativos no que diz respeito à movimentação de mercadorias urbanas.

O *City logistics* compreende o TUC como um sistema. Essa abordagem possibilita compreender por que o transporte ocorre e como pode ser aprimorado, uma vez que um sistema é caracterizado por sua função, objetivo, componentes e interações entre esses componentes. Holguín-Veras *et al.* (2015) descrevem 54 medidas de *City logistics*, analisando mais de 150 referências, e as classificaram em oito grupos principais. Seu principal objetivo é fornecer um catálogo com potenciais medidas que podem ser consideradas pelos órgãos públicos para

melhorar seus sistemas de transporte urbano. A seguir, são apresentadas as classificações dos grupos conforme os autores (HOLGUÍN-VERAS *et al.*, 2015):

- 1) Gerenciamento da infraestrutura;
- 2) Gestão de áreas de estacionamento;
- 3) Estratégias relacionadas a veículos;
- 4) Gestão de tráfego;
- 5) Preços, incentivos e tributação;
- 6) Gerenciamento logístico
- 7) Gestão da demanda e uso do solo
- 8) Comprometimento dos atores envolvidos no transporte urbano de mercadorias

O primeiro grupo de iniciativas tem como objetivo a melhoria da infraestrutura viária existente para aumentar a mobilidade do TUC, são exemplos desse grupo: terminais intermodais, construção de rampas, faixas exclusivas, vias rápidas, adaptação da infraestrutura existente ou criação de novas infraestruturas (LIU *et al.*, 2019; GUANGYUAN *et al.*, 2019). O segundo grupo de iniciativas tem como objetivo de melhorar a eficiência das operações de carga e descarga, são exemplos desse grupo: criação, restrição e adaptação de áreas de carga e descarga, bem como implantação de sistemas de reserva de vagas (SILVA *et al.*, 2019; LABEGALINI *et al.*, 2021). O terceiro grupo de iniciativas tem como objetivo melhorar as condições ambientais, de modo a incentivar o uso de tecnologias e de práticas que diminuam as externalidades negativas geradas pelos veículos de carga, são exemplos desse grupo: padrões de emissões, entrega *lownoise* e regulamentações (GONZÁLEZ-VARONA *et al.*, 2020; NAHRY E AYU 2021).

O quarto e quinto conjunto de iniciativas visam aprimorar as condições de tráfego por meio de técnicas de engenharia e controle de tráfego, promovendo a adoção de tecnologias emergentes e facilitando o gerenciamento da demanda do TUC (WEI *et al.*, 2021; RICCARDO *et al.*, 2018; SOPHA *et al.*, 2016). São exemplos desses grupos de iniciativas: restrições de acesso de veículos, tempo e gestão de tráfego, programas e incentivos para veículos menos poluentes, pedágios e tarifação de vias urbanas. O sexto e o sétimo grupo tem como objetivo incentivar a mudança da forma como as entregas são realizadas para reduzir as externalidades negativas do TUC, melhorando a eficiência da entrega na última milha e/ou alterando a demanda subjacente ao invés de modificar as atividades logísticas ou o tráfego de veículos. São exemplos de iniciativas desse grupo: consolidação de cargas, centros de destruição urbanos,

sistemas inteligentes de transportes, veículos elétricos, entregas noturnas, meios alternativos de entrega e *Delivery Lockers* (DLs) e integração do TUC a políticas de uso do solo (ALVES *et al.*, 2023; VAZQUEZ-NOGUEROL *et al.*, 2021); STINSON *et al.*, 2019). É nesse grupo de iniciativas que se encontra a maioria das iniciativas estudadas para o TUC do *e-commerce*.

O último grupo de iniciativas visa aumentar e engajar lideranças do setor público e privado na compreensão das questões do TUC e na busca de soluções por meio de parcerias e comitês (GUTIERREZ-FRANCO *et al.*, 2021; ALVES *et al.*, 2019). É importante destacar que, independentemente da iniciativa a ser implantada, deve-se levar em consideração os *stakeholders* envolvidos no TUC e as iniciativas desse grupo devem ser levadas em consideração para todos os grupos anteriores. O guia ainda destaca a participação do setor privado durante o processo, considerando a participação dos principais *stakeholders* envolvidos em todas as questões do TUC. Todos os grupos de iniciativas, seus objetivos e aplicações podem ser encontrados em Holguín-Veras *et al.* (2015).

Após a apresentação de alguns conceitos da logística urbana e das iniciativas para o TUC, nas próximas seções são apresentadas discussões sobre os temas específicos que permeiam essa tese. São eles: o TUC do *e-commerce* no contexto de eventos disruptivos, o uso de DLs para amenizar os impactos gerados por essa modalidade de transporte sobre os ambientes urbanos e a modelagem e simulação como uma ferramenta de apoio à decisão.

2.2 Transporte urbano de cargas durante eventos disruptivos

De acordo com Holguín-Veras *et al.* (2021) um evento disruptivo pode ser caracterizado como um evento que provoca mudanças na estrutura e modelo operacional de uma organização, trazendo novas exigências ao seu desempenho e ao planejamento operacional. Exemplos de eventos disruptivos são desastres naturais, como terremotos e tsunamis (por exemplo, o tsunami no Japão em 2011 e seu enorme impacto nas CS em todo o mundo), catástrofes provocadas pelo homem (por exemplo, a explosão na fábrica da BASF na Alemanha em 2016) e disputas legais ou greves (por exemplo, a greve dos transportadores de mercadorias na França em 2016 e dos caminhoneiros no Brasil em 2018) (IVANOV *et al.*, 2019). Tais eventos são caracterizados por apresentar um impacto forte e imediato na estrutura em toda a CS, uma vez que algumas fábricas, fornecedores, centros de distribuição e redes de transporte ficam temporariamente congestionados e precisam se planejar para atender as flutuações de demanda em toda rede. Por outro lado, o aumento da demanda resultante e os atrasos nas entregas se propagam a jusante da CS, causando o efeito cascata e a degradação do desempenho das operações em termos de

receita, nível de serviço e reduções de produtividade (IVANOV *et al.*, 2019; PAVLOV *et al.*, 2022; DOLGUI *et al.*, 2020; GOLDBECK *et al.*, 2020; LI e ZOBEL, 2020).

Outro caso específico de evento disruptivo são os surtos epidêmicos. Os surtos epidêmicos representam um caso especial de risco em toda a CS, que se caracteriza por três componentes: (i) existência de flutuações de demanda de longo prazo e sua escala imprevisível, (ii) propagação simultânea dos impactos na CS (efeito cascata) e propagação de surto epidêmico na população (propagação de pandemia) e (iii) aumento simultâneo da demanda de itens e da infraestrutura logística. Diferentemente de outros eventos disruptivos, os surtos epidêmicos começam pequenos, mas aumentam rapidamente e se dispersam em muitas regiões geográficas (IVANOV, 2020). Exemplos recentes incluem Ebola, gripe suína e, mais recentemente, o coronavírus (COVID-19/SARS-CoV-2) (PAVLOV *et al.*, 2022).

Embora as pesquisas sobre como lidar com surtos epidêmicos do ponto de vista da logística humanitária forneça um corpo de conhecimento maduro (ALTAY *et al.*, 2018, ANPARASAN e LEJEUNE, 2018, DUBEY *et al.*, 2019, FARAHANI *et al.*, 2020), a literatura sobre os impactos de surtos epidêmicos sobre o TUC do *e-commerce* é escassa. Essa lacuna de pesquisa representa uma oportunidade para o desenvolvimento de contribuições substanciais (MAVI *et al.*, 2022; SAKAI *et al.*, 2022; BUDEL RAI *et al.*, 2022; MILEWSKI *et al.*, 2021; STRAUBINGER *et al.*, 2023). Embora haja algumas informações sobre surtos epidêmicos anteriores relacionados ao TUC, como a disseminação do vírus Ebola, que afetou negativamente a logística de entregas resultando em aumento inesperado da demanda e no atraso de mercadorias nas áreas urbanas (BSI, 2014), e as lições aprendidas durante esse período descritas por Calnan *et al.* (2018). Essas lições apontam para a necessidade de ferramentas de apoio à decisão que ajudem a mensurar os impactos de surtos epidêmicos sobre as operações de entrega do *e-commerce* e auxiliem a tomada de decisão em tempo real para manter a resiliência das operações. No entanto, há uma carência de estudos detalhados sobre o tema. Mais pesquisas são fundamentais para preencher essa lacuna, fornecendo, assim, uma análise aprofundada dos impactos específicos de surtos epidêmicos sobre o TUC do *e-commerce* e explorando estratégias para lidar com esses desafios de maneira eficaz (HOLGUÍN-VERAS *et al.*, 2023).

De acordo com Ivanov (2021), é intuitivo esperar reduções no desempenho operacional e flutuações de demanda durante eventos disruptivos. Isso confirma a análise de relatórios relacionados à pandemia da COVID-19, onde a adoção do sistema de entregas foi um dos principais meios encontrados para garantir a manutenção das organizações e atender as necessidades dos clientes (SAWIK *et al.*, 2022; HOLGUÍN-VERAS *et al.*, 2023). Segundo

relatório divulgado pela ABCOMM (2021), somente no Brasil, aproximadamente 301 milhões de transações foram realizadas no comércio eletrônico em 2020, por mais de 79,7 milhões de pessoas durante o período pandêmico. Sozinho, o segmento de varejo eletrônico de negócios de comércio eletrônico do país atingiu um crescimento 126,3 bilhões de reais em 2020. O aumento inesperado de 68% das compras online em 2020, em comparação ao ano anterior, fez com que as empresas reestruturassem suas operações de entrega. Canais de distribuição em muitos setores experimentaram grandes mudanças em termos de sua estrutura, práticas operacionais e requisitos de desempenho (ABUDUREHEMAN E NILUPAER, 2021).

Em um ambiente tão turbulento, varejistas e transportadoras precisam adaptar suas operações para atender seus clientes e se manter competitivos (IVANOV, 2021). O aumento de mercadorias para serem entregues, de destinos a serem visitados, de mais veículos em rota e processos extras para cumprir as medidas de biossegurança sugeridas pelos órgãos de saúde, são alguns dos desafios enfrentados por estes setores (VIU-ROIG e ALVAREZ-PALAU, 2020). Negociação de prazos e preços com fornecedores, mudança de modelo de negócio para prestação de serviços, investimento em novas tecnologias, busca por crédito e qualificação podem ser alguns dos caminhos adotados para se adaptar ao novo cenário gerado pelo conhecimento de eventos disruptivos (PORSSE *et al.*, 2020).

A demanda por serviços de entrega tende a aumentar substancialmente, principalmente, nas áreas urbanas (DE LA TORRE *et al.*, 2021). Deste modo, assim como os varejistas buscam medidas para não interromper as suas vendas durante estes períodos, as transportadoras precisam adotar estratégias de atendimento da demanda de entregas de uma forma segura. Essa tendência cria uma pressão sobre as cidades em termos de tráfego para garantir modelos de negócios de alto desempenho por meio da gestão eficiente do planejamento de entregas (DE LA TORRE *et al.*, 2021; SAKAI *et al.*, 2022). Nesse contexto, o aumento das entregas na última milha, agrava os problemas vivenciados pelo ambiente urbano, evidenciando a necessidade de ferramentas para auxiliar no planejamento das operações e amenizar os impactos gerados sobre as operações de entrega (MILEWSKI *et al.*, 2021).

O serviço de entrega de última milha é considerado a parte de maior custo da viagem e pode chegar a até 75% dos custos logísticos totais (VIU-ROIG e ALVAREZ-PALAU, 2020). No entanto, como o serviço logístico é muitas vezes intangível, os consumidores tendem a considerá-lo como um serviço já adquirido durante o processo de compra, tendo pouca disposição para pagar mais por um serviço melhor (GUO *et al.*, 2019). Esses desafios, muitas vezes, inviabilizam propostas de melhorias, conforme refletido em projetos que falharam (VIU-

ROIG E ALVAREZ-PALAU, 2020). Isso, por sua vez, também demonstra que as soluções logísticas convencionais podem já não ser mais adequadas e que é necessário um pensamento inovador para sua utilização (HOLGUÍN-VERAS *et al.*, 2021).

Neste contexto, as empresas de serviços de transporte enfrentam o desafio de melhorar suas operações para atender o aumento da demanda de entregas, sem comprometer seu nível de serviço (FARIAS, 2020; MONTEMURRO, 2020; SENHORAS, 2020). A literatura aponta para a falta de metodologias que auxiliem os tomadores de decisão e prestadores de serviço de entrega a compreender as operações e o desempenho dos sistemas de distribuição urbana durante eventos disruptivos (MAVI *et al.*, 2022; SAKAI *et al.*, 2022; BUDEL RAI *et al.*, 2022; MILEWSKI *et al.*, 2021; STRAUBINGER *et al.*, 2023). Essas metodologias permitiriam formular políticas integradas e avaliar iniciativas que poderiam melhorar a eficiência do processo de entrega e reduzir suas externalidades negativas, melhorando a sustentabilidade das operações (AKTAS *et al.*, 2020; ALVES *et al.*, 2019; GONZÁLEZ-VARONA *et al.*, 2020; HOLGUÍN-VERAS *et al.*, 2023).

As discussões sobre o TUC do *e-commerce* durante a eventos disruptivos ainda são recentes e poucos estudos tratam sobre o assunto. Mavi *et al.* (2022) analisaram o papel do transporte e o impacto das inovações de transporte durante um contexto pandêmico, sem considerar o impacto do aumento das entregas nas operações do TUC do *e-commerce*. Sakai *et al.* (2022) propuseram uma estrutura teórica de modelagem de demanda em períodos pré e pós pandemia da COVID-19, considerando diferentes modos de entrega, sem, contudo, realizar aplicações em casos reais. Milewski *et al.* (2021) realizaram uma comparação do gasto com combustível entre as entregas realizadas em domicílio e em pontos de auto coleta. Os autores consideram a demanda de entregas durante o período da pandemia da COVID-19, porém sem realizar comparações com períodos de normalidade. Straubinger *et al.* (2023) explora o impacto do comércio eletrônico e das entregas por drones em ambientes urbanos, frente ao crescimento do comércio eletrônico após a pandemia da COVID-19 por meio de projeções de crescimento do *e-commerce*. Apesar dessas interessantes iniciativas, observa-se a carência de estudos mais detalhados sobre os impactos destes eventos sobre as operações de transporte e de ferramentas que mensurem e subsidiem a tomada de decisões para todos os envolvidos no processo (HOLGUÍN-VERAS *et al.*, 2023). Em especial os que incorporem a visão de prestadores de serviço de transporte, que são diretamente afetados pelo aumento das entregas durante eventos disruptivos, como durante a pandemia da COVID-19.

A modelagem e simulação são reconhecidas como ferramentas adequadas para observar e prever comportamentos de sistemas ao longo do tempo (DE LA TORRE *et al.*, 2021). Os estudos de simulação permitem a combinação de abordagens de simulação amplamente utilizadas em estudos de transporte e logística (ALVES *et al.*, 2022; IVANOV *et al.*, 2020, MAVI *et al.*, 2022; SAKAI *et al.*, 2022; MILEWSKI *et al.*, 2021), e que podem auxiliar na análise e apoio à decisão e na avaliação de iniciativas. Os modelos desenvolvidos são especialmente úteis para análise e apoio a decisão, quando os impactos das interrupções no desempenho das operações logísticas precisam ser calculados sob condições de aumento da demanda (MAVI *et al.*, 2022; SAKAI *et al.*, 2022; MILEWSKI *et al.*, 2022). Além disso, iniciativas para o TUC podem ser analisadas sob uma variedade de indicadores financeiros, de clientes e de desempenho operacional (PAVLOV *et al.*, 2022; IVANOV, 2020).

Nas próximas seções, são abordados os desafios enfrentados pelo TUC do *e-commerce* durante a eventos disruptivos, além de discutir como a adoção de iniciativas de logística urbana, como o uso de *Delivery Lockers* (DLs) e a aplicação da modelagem e simulação, podem contribuir para auxiliar no planejamento e apoio à decisão, amenizando os impactos gerados.

2.3 Desafios e iniciativas de *City logistics* para o *e-commerce*

O crescimento do comércio eletrônico alterou significativamente o cenário das entregas em domicílio. Em vez de frequentar lojas físicas, as pessoas estão cada vez mais optando por comprar produtos online (BULDEO RAI *et al.*, 2022). Essa mudança nos padrões de consumo, intensifica os desafios enfrentados pelo TUC do *e-commerce* e impacta a mobilidade nas cidades, resultando na substituição de algumas viagens de compras pelo transporte de cargas na última milha (ARNOLD *et al.*, 2018).

Segundo Milewski *et al.* (2021) houve um aumento no número de veículos de baixa tonelagem em circulação (veículos leves de mercadorias até 3,5 toneladas de peso bruto), que são, em muitos casos, mal utilizados e geram externalidades negativas, agravando os problemas do TUC e que impactam a qualidade de vida do ambiente urbano. Diante disso, torna-se essencial realizar medições e investigações sobre como mitigar os impactos causados pelo aumento da circulação desses veículos e melhorar a eficiência da logística de última milha nas áreas urbanas. Essas medidas são urgentes para otimizar as operações de entrega do comércio eletrônico, contribuindo para reduzir as externalidades negativas associadas ao TUC e seus efeitos adversos (VIU-ROIG E ALVAREZ-PALAU, 2020).

Algumas iniciativas de *City logistics* têm sido estudadas e implementadas para melhorar o transporte urbano de cargas do *e-commerce* (AKTAS *et al.*, 2020; ALVES *et al.*, 2019; GONZÁLEZ-VARONA *et al.*, 2020; BROWNE *et al.*, 2014; ARNOLD *et al.*, 2018; ALVES *et al.*, 2023). Essas iniciativas visam tornar as entregas mais eficientes, sustentáveis e convenientes nas áreas urbanas. São elas:

- Centros de Distribuição/Consolidação: Estabelecimentos de distribuição/consolidação urbanos próximos às áreas de alta demanda para reduzir o tempo de entrega (BALLANO *et al.*, 2023; CALABRÒA *et al.*, 2022; DIFRANCESCO *et al.*, 2021).
- Veículos Elétricos e de Baixa Emissão: Adoção de veículos elétricos, híbridos ou movidos a energia limpa para reduzir a poluição do ar e as emissões de carbono nas cidades.
- Entrega por Bicicleta: Utilização de bicicletas de carga e veículos de pequeno porte para entregas de última milha em áreas urbanas, reduzindo o congestionamento e a poluição (ARORA *et al.*, 2022; LEE *et al.*, MILER *et al.*, 2021).
- *Delivery lockers* e Pontos de Coleta: Instalação de armários inteligentes em locais estratégicos das cidades, onde os clientes podem retirar suas encomendas, evitando a necessidade de múltiplas tentativas de entrega.
- Compartilhamento de Veículos: Parcerias entre empresas de logística para compartilhar veículos e recursos, reduzindo os custos operacionais e a pegada de carbono (ERIC *et al.*, 2023; ALVES *et al.*, 2023; CALABRÒ *et al.*, 2023; LEUNG; OUYANG; HUANG 2023; MERKERT; BLIEMER; FAYAZ 2022; SAKAI *et al.*, 2022).
- Roteirização: Uso de tecnologia avançada para otimizar rotas de entrega, minimizar congestionamentos e evitar desperdício de tempo e recursos (YANG E STRAUSS 2017; FU *et al.*, 2017; SOPHA *et al.*, 2016; WANG *et al.*, 2017).
- Entregas com Drones: Testes e estudos sobre o uso de drones para entregas rápidas em áreas urbanas, especialmente em regiões de difícil acesso (NGUYEN *et al.*, 2023; ZHANG *et al.*, 2023; YETIS E KARAKOSE 2021).

Essas iniciativas têm buscado amenizar os desafios do transporte de cargas em áreas urbanas densamente povoadas (MILEWSKI *et al.*, 2021). Elas também têm buscado melhorar

a experiência do cliente ao oferecer opções de entrega convenientes e confiáveis (ALVES *et al.*, 2023). Em termos práticos, essas soluções apresentam o potencial de auxiliar na superação de alguns desafios do TUC do *e-commerce*, tais como: a alta fragmentação; o baixo volume das entregas; restrições de horário ou indisponibilidade de pessoas para receber a encomenda; acesso a regiões que possam apresentar dificuldade ou limitação (zonas rurais, regiões remotas, assentamentos urbanos etc.); entre outros (ENAP, 2021 e ALVES *et al.*, 2022).

Dentre as iniciativas estudadas, as entregas em DLs tem recebido considerável atenção em várias pesquisas nos últimos anos, surgindo como uma alternativa à entrega tradicional porta a porta (ALVES *et al.*, 2019; GONZÁLEZ-VARONA *et al.*, 2020; KIOUSIS *et al.*, 2019; PERBOLI *et al.*, 2018; SUWATCHARACHAITIWONG *et al.*, 2020; GONZÁLEZ *et al.*, 2023). Uma pesquisa conduzida por Milewski *et al.* (2021), em Szczecin, na Polônia, investigou a implementação dos DLs e demonstrou uma significativa melhoria nas operações de um provedor de serviços de transporte. O estudo revelou um aumento de 10 vezes no número de encomendas entregues, enquanto houve uma redução de 53% na distância percorrida, quando comparado ao sistema de entrega tradicional. Além disso, também se observou uma redução de 95% nas emissões de CO₂, associadas à frota da empresa.

Arnold *et al.* (2018) conduziram um estudo sobre as viagens resultantes das compras *online* na cidade de Antuérpia. Eles simularam um cenário real envolvendo entregas em domicílio realizadas por furgões, além de três cenários alternativos: considerando o uso de DLs, uso de bicicletas de carga e um sistema híbrido (combinação de bicicletas de carga e DLs). O cenário que envolvia o sistema híbrido demonstrou os melhores resultados em termos de custos operacionais e externos.

Na Polônia, Iwan *et al.* (2016) investigaram a usabilidade e eficiência dos DLs implantados pela *Inpost*. Ao questionarem os usuários sobre os fatores determinantes para a escolha de uma localização adequada para utilizar esse sistema, identificaram que: a localização deve estar próxima da residência (33%), no trajeto para o trabalho (21%), próxima de centros comerciais (10%), perto de estações de transporte público (5%), próxima de estacionamentos (19%) e em locais seguros (11%).

Além das características intrínsecas dos DLs (horário de funcionamento, tipo de loja, armazenamento, espaço) mencionadas anteriormente, Zhang *et al.* (2018) afirmam que o ambiente urbano também afeta seu desempenho. A localização determina quantos clientes podem acessá-los por meios não poluentes e tem a capacidade de induzir comportamentos sustentáveis nos clientes do *e-commerce*. Ao mesmo tempo, a infraestrutura urbana

circundante, determina o quão conveniente é fornecê-los do ponto de vista dos operadores. Nesse sentido, a última milha da cadeia de abastecimento, entre o cliente e os pontos de coleta, pode ser explorada para maximizar as oportunidades de criação de capital social e uma logística de comércio eletrônico mais sustentável e conveniente (MILEWSKI *et al.*, 2021).

Alves *et al.* (2019) demonstram que o sucesso dos DLs também pode ser atribuído à possibilidade de pedidos não entregues. Uma entrega em domicílio pode não acontecer se o cliente ou seus vizinhos não estiverem em casa no momento da entrega. Nesse caso, o pacote precisa ser enviado para um ponto de serviço ou coleta próximo, o que leva a um esforço de entrega extra substancial. No Brasil, os custos adicionais devido a pedidos não entregues já chegaram a R\$3,7 bilhões por ano (EBIT, 2019). Os autores avaliaram a implantação de DLs como solução de última milha, considerando o comportamento e a interação dos *stakeholders* do *e-commerce* para diminuir o número de reentregas na cidade de Belo Horizonte e demonstraram que o uso dessa medida pode reduzir o custo de reentregas em 33%. Sawik *et al.* (2022) também simularam uma rede de DLs para melhorar a distribuição de última milha. Os resultados obtidos revelaram reduções significativas no número de viagens necessárias para atender à demanda de entregas, bem como na quantidade de veículos de transporte utilizados, nas distâncias percorridas e no número de paradas para realizar as entregas, em cidades como Pamplona (Espanha), Zakopane e Cracóvia (Polônia)

Em resumo, a utilização desse sistema automatizado para entrega de última milha oferece várias vantagens: é uma solução simples, que reduz a necessidade de funcionários, a falha nas entregas e, conseqüentemente, as tentativas posteriores de entrega. Isso, por sua vez, possibilita ganhos para toda a operação em termos de custos, emissões, geração de viagens, entre outros (FARIA, 2021). Embora a literatura sobre logística de última milha seja extensa e pesquisas sobre o uso dos DLs já existam, há uma lacuna para se explorar sobre como o uso dos DLs podem melhorar as operações do TUC, principalmente no Brasil, onde sua aplicação prática ainda é pequena (OLIVEIRA *et al.*, 2019; ALVES *et al.*, 2023; MASTEGUIM e CUNHA, 2022).

Nesse contexto, embora a ferramenta apresentada neste trabalho possibilite a avaliação de diferentes iniciativas de *City logistics*, a presente pesquisa visa complementar os estudos sobre DLs e contribuir para o conhecimento geral sobre as vantagens desta opção de entrega durante eventos disruptivos, utilizando modelagem e simulação. Na próxima seção são discutidas as vantagens do uso de modelagem e simulação nos estudos do TUC do *e-commerce*.

2.4 Modelagem e simulação

Montevecchi *et al.* (2010) definem a simulação como a importação da realidade para um ambiente controlado, onde seu comportamento pode ser estudado sob diversas condições, sem riscos físicos ou altos custos envolvidos. Conforme destacado por Banks *et al.* (2010) e Sargent (2013), a simulação tem sido crescentemente utilizada como ferramenta de apoio à decisão. Por meio da modelagem e da análise dos resultados, ela possibilita a visualização do impacto das mudanças de parâmetros no desempenho dos sistemas. Tako e Robinson (2012) enfatizam que a simulação é uma abordagem apropriada e amplamente aceita para analisar detalhadamente sistemas logísticos, levando em conta sua complexidade operacional.

Lopes (2017) afirma que a simulação tem sido usada para obter informações para o planejamento do TUC e conduzir análises no domínio da logística e transporte. Sua capacidade de explicar comportamentos complexos de um sistema e suas interações, além de tempos computacionais reduzidos, a torna uma ferramenta em potencial para avaliação de desempenho, teste de hipóteses e inferências para a tomada de decisão. Comparada aos demais métodos heurísticos de apoio à decisão, a simulação permite a representação do sistema real para análise de possíveis alternativas, respondendo a perguntas do tipo "e se". Cabe ao usuário decidir pela escolha da melhor alternativa antes de sua implementação ou pelo aprimoramento do desempenho de um sistema já em operação, com custos e riscos reduzidos (ARNOLD *et al.*, 2018).

Conforme indicado por Lopes (2017), a simulação busca representar a realidade dos sistemas por meio do uso de modelos. Um modelo é definido como um conjunto de partes e elementos reais que interagem entre si para alcançar um determinado objetivo comum (CHWIF e MEDINA, 2015). Segundo Montevecchi *et al.* (2010), um modelo é uma representação simplificada da realidade construída para uma finalidade específica. Esses modelos de simulação podem ser divididos em:

- Modelos estáticos: aqueles que não sofrem influência do tempo, não havendo relógio de simulação envolvido, ou seja, o estado do modelo não muda em relação ao tempo;
- Modelos dinâmicos: modelos que sofrem influência do tempo, sendo o estado do modelo resultante de segundos, horas, dias e meses simulados no relógio de simulação.

Os modelos de simulação também são classificados de acordo com a forma de tratamento de dados, sendo eles: Determinísticos e Estocásticos. Nos modelos determinísticos,

os dados assumem valores determinados e não probabilísticos (randômicos). Lopes (2017) ressalta que um modelo determinístico, em seus processos intermediários, pode incluir um componente randômico para representar as escolhas de caminhos para as entidades. Por outro lado, o modelo estocástico descreve sistemas que variam no tempo de forma aleatória, em que os dados randômicos são definidos sobre um espaço de amostragem comum.

De acordo com Montevechi *et al.* (2010), esses modelos de simulação também são classificados em relação às suas variáveis, sendo elas:

- Variável discreta: uma ação instantânea que ocorre em um único momento e pode causar mudanças no estado do sistema simulado. Nesse tipo de simulação, o computador mantém um dispositivo temporal conhecido como "relógio de simulação", que avança à medida que cada evento acontece em um determinado instante;
- Variável contínua: uma ação que não cessa, continuando ininterruptamente em relação ao tempo. As variáveis contínuas geralmente são representadas por equações diferenciais e permitem que as variáveis mudem continuamente ao longo do tempo.

A Tabela 1 apresenta as características de cada um desses modelos de simulação.

Tabela 1- Classificação dos modelos de simulação

Características	Modelos de Simulação	
Tempo	Estáticos: Nos modelos de simulação estática, o sistema é representado levando em consideração um determinado momento. Neste caso, o tempo não desempenha papel relevante no modelo.	Dinâmicos: A representação de um sistema à medida que o mesmo evolui no decorrer do tempo é a característica essencial dos modelos de simulação dinâmica. Portanto, o tempo é um elemento fundamental em um modelo de simulação dinâmica
Entrada dos dados	Determinísticos: Um modelo de simulação é classificado como determinista por não conter elementos de probabilidade. Assim, o conjunto de dados de entrada e as relações especificadas no modelo irão gerar dados de saída deterministas.	Estocásticos: A essência dos modelos de simulação estocásticos está nos dados de entrada aleatórios. Por consequência, os dados de saída também são aleatórios. É normal, nesse tipo de modelo, a presença de componentes probabilísticos
Variáveis dependentes	Contínua: Acompanha continuamente a dinâmica no sistema ao longo do tempo, sem saltos discretos de um evento ao outro. Assim, na simulação contínua o tempo é quebrado em pequenos intervalos e o estado do sistema é avaliado de acordo com o que ocorre dentro de cada intervalo.	Discreta: Cada evento ocorre em um determinado instante de tempo e marca uma mudança de estado no sistema. Entre eventos consecutivos, considera-se que o sistema não sofre mudança alguma, assim, a simulação pode saltar diretamente do instante de ocorrência de um evento para o próximo

Fonte: Alves *et al.* 2019

A partir dessa classificação, existem três abordagens principais de modelagem e simulação amplamente utilizadas em pesquisas de transporte e logística (TAKO e ROBINSON, 2012):

- Simulação a Eventos Discretos (SED);
- Dinâmica de sistemas (DS) e;
- Simulação baseada em agentes (SBA).

Os modelos de SED representam os sistemas onde as mudanças de estado ocorrem em pontos discretos no tempo e avaliam as medidas de desempenho das operações logísticas, sob um grau de incerteza em um nível operacional ou tático (NOGUEIRA *et al.*, 2022). A modelagem de DS é mais adequada para logística e planejamento de estoque em um nível estratégico e as mudanças de estado ocorrem continuamente ao longo do tempo (MELKONYAN *et al.*, 2020). Comparado a essas duas abordagens tradicionais, o SBA permite modelar um sistema do ponto de vista do agente (pessoa, objeto, veículo, equipamento etc.) e considera seus comportamentos e regras individuais de tomada de decisão (ALVES *et al.*, 2023). Além disso, a SBA auxilia na modelagem de agentes heterogêneos e autônomos, bem como no surgimento da auto-organização (MACAL, 2016). A perspectiva do agente, permite que os tomadores de decisão trabalhem com modelos de comportamentos reais (ou supostos) do agente, ao invés de versões idealizadas ou normativas, o que pode ajudar a perceber mudanças emergentes de estado em todo o sistema por meio das interações entre os agentes (ALVES *et al.*, 2019). Ao observar os efeitos dos atributos, comportamentos e interações, a SBA oferece flexibilidade para entender o sistema como um todo.

A SED possui a vantagem de poder representar sistemas complexos com maior abrangência. No entanto, suas respostas não são tão precisas quanto as obtidas nas simulações numéricas, tornando mais difícil a validação dos resultados. Chwif e Medina (2014) destacam que os sistemas reais geralmente apresentam uma maior complexidade devido à sua natureza dinâmica e aleatória, e assim, a SED consegue capturar essas características com mais fidelidade quando submetida às mesmas condições de contorno. Sargent (2013) afirma que a SED é normalmente usada quando o sistema real é muito complexo para ser analisado satisfatoriamente por um modelo matemático, sendo muitas vezes a única abordagem prática para a resolução do problema.

Segundo Lopes (2017), os modelos de simulação comumente utilizados para apoiar a tomada de decisão em logística urbana focam inicialmente em estimar os pontos de origem e destino das mercadorias, calcular a rota ótima considerando as condições de tráfego e, por fim,

gerar os parâmetros de saída. Essa análise é estática, oferecendo um valor ótimo global para o cálculo de custos, demanda e fluxo de tráfego, sem estimar os impactos das medidas de logística urbana para os diversos agentes envolvidos. Por outro lado, a SED lida com eventos discretos em tempo real, permitindo que as empresas ajustem dinamicamente suas operações de entrega com base em dados em tempo real, como condições de tráfego, demanda de clientes e disponibilidade de recursos.

A SBA permite incorporar o comportamento dos stakeholders envolvidos, oferecendo uma abordagem mais abrangente e utilizando modelos de simulação para prever o comportamento do sistema logístico em diferentes cenários. Isso possibilita que as empresas avaliem o impacto de mudanças nas operações antes de implementá-las no mundo real, como a introdução de novas rotas de entrega, alterações nos horários de entrega ou a adoção de novas tecnologias (ALVES *et al.*, 2022). Em conjunto, essas técnicas possibilitam uma tomada de decisão mais assertiva e estratégica em tempo real, melhorando a eficiência e a eficácia das operações de logística urbana.

Reijers (2017) afirma que a SED e a SBA trabalham com sistemas em tempos discretos, ou seja, alternam de um evento para outro. A SED, segundo os mesmos autores, está envolvida com a compreensão do desempenho do sistema, por meio de medidas de desempenho. Por isso, ela necessita que seus modelos tenham de moderado a baixo grau de abstração. Já a SBA pode ser utilizada em todos os níveis de abstração, sendo seus agentes modelados como objetos de naturezas e escalas diversas, onde agentes podem ser, por exemplo: 1) em um nível mais simples - pedestres, carros ou robôs; 2) no nível médio - clientes e; 3) no nível mais alto - empresas concorrentes (REIJERS, 2017).

De acordo com Macal (2016), o que diferencia a SED e a SBA são sua flexibilidade e eficiência para modelar diferentes tipos de sistemas. A SBA é adequada para sistemas onde as entidades interagem entre si frequentemente. A SED possui várias visões do sistema, como eventos agendados, interações de processos, mapeamento de atividades e outras formalidades, que variam de acordo com a flexibilidade do modelo. As interações dentro de um modelo de SED são inerentes aos processos (por exemplo, o processo de chegada, processo de serviço etc.), ao invés de serem entre as entidades. O que por sua vez, a diferencia da SBA, onde as interações são entre as entidades. De forma geral, a maioria das plataformas de SED não são designadas para lidar com esse tipo de modelo, onde o número de eventos aumenta exponencialmente, tornando o modelo ineficiente e difícil de analisar (IVANOV, 2021).

Nos modelos de SED, a entidade possui características individuais, mas de caráter passivo, onde as regras são concentradas nos blocos de fluxograma. Já na SBA, o processo é descrito do ponto de vista do agente, onde algumas das regras são descentralizadas, fazendo com o agente diminua o seu caráter passivo e passe a ter comportamento individual. Ainda assim, alguns comportamentos são difíceis ou quase impossíveis de se modelar utilizando apenas SBA ou SED (REIJERS, 2017). Isso permite a utilização de metodologias combinadas para modelar esses sistemas. Na próxima seção, abordamos uma abordagem combinada de simulação, entre SBA e SED, utilizada neste estudo, a Simulação Híbrida (SH).

2.5 Simulação híbrida

De acordo com Ivanov (2020), o inevitável crescimento da complexidade dos sistemas de transporte tem aumentado a dificuldade de se modelar a realidade, exigindo aplicação de ferramentas que sejam capazes de manipular, simultaneamente, os aspectos estratégicos, táticos e operacionais desses sistemas. Para Sartorello (2021) uma alternativa viável para tratar essa complexidade é buscar maneiras de combinar técnicas de simulação, por meio de metodologias híbridas.

Diante das possibilidades de utilização das diferentes abordagens de simulação, a utilização de metodologias híbridas, como a combinação de SED e a SBA, pode agregar maior nível de complexidade aos sistemas modelados e proporcionar respostas antes não tão fáceis de serem respondidas (REIJERS, 2017). Brito (2018), ressalta a importância de se utilizar a SED e SBA em conjunto para modelar sistemas logísticos, tornando possível capturar particularidades de um determinado sistema, que muitas vezes, somente com a SED não é possível, ou ainda de difícil análise.

A SH ou também Simulação Combinada (SC), como pode ser encontrada na literatura, se refere à aplicação combinada de abordagens de simulação discreta e contínua, como por exemplo SED e SBA, em um único estudo de simulação (IVANOV, 2021). Esse tipo de simulação faz uso de abordagens interdisciplinares, incluindo paradigmas de pesquisa, estruturas, metodologias, técnicas e ferramentas interdisciplinares, com o objetivo de criar a melhor representação possível do sistema de interesse. Bae *et al.* (2022) enfatizaram a importância de usar a SH para modelar sistemas logísticos, permitindo que os pesquisadores simulem as particularidades de um determinado sistema ou de sistemas de difícil análise. Esses métodos, quando combinados, proporcionam vantagens na modelagem de sistemas logísticos,

representando mais fielmente sistemas reais e auxiliando na avaliação de iniciativas para o TUC do *e-commerce*.

Ao se realizar uma revisão bibliográfica, percebe-se que existem aplicações tanto da SED, quanto da SBA, na área de logística urbana, com uma vasta gama de objetivos abordados (ALVES *et al.*, 2023; SERRANO-HERNANDEZ *et al.* 2021; MUÑOZ-VILLAMIZAR *et al.*, 2021; KHALID e CHANKOV, 2020; ZHIQIANG *et al.* 2020; GUO *et al.* 2019; STINSON *et al.* 2019; ALVES *et al.*, 2019; SOPHA *et al.*, 2016; TANIGUCHI *et al.*, 2014). No entanto, o mesmo não acontece com a combinação de ambas as metodologias, de forma a se aproveitar as vantagens de cada uma delas. Uma das possíveis alternativas para modelar esses sistemas é o uso de SH (BRITO, 2018). Tal abordagem, permite a análise de um problema, a fim de encontrar possíveis soluções e propostas de planejamento, de modo a auxiliar os tomadores de decisão no momento de suas escolhas, principalmente, quando aplicada a problemas complexos e para avaliação de iniciativas para o TUC. Considerando para isso, seus aspectos estratégicos, táticos e operacionais.

Como os estudos de simulação lidam com parâmetros dependentes do tempo, duração das medidas de recuperação e degradação e recuperação da capacidade, eles ganharam um lugar importante na pesquisa acadêmica. Entre as ferramentas e abordagens de simulação para se analisar sistemas logísticos, a SH vem provando ser uma ferramenta muito bem-sucedida utilizada no apoio à decisão (IVANOV, 2020; 2021). Com base na combinação de diferentes abordagens de simulação, essa abordagem fornece a possibilidade de visualização do desempenho de operações, constituindo um conjunto completo de ferramentas para representar um sistema logístico real (DOLGUI *et al.*, 2020; PAVLOV *et al.*, 2022).

Este estudo apresenta o DISRUPSIM, uma ferramenta que tem como base um modelo de SH, desenvolvida para representar o comportamento das entregas do *e-commerce* durante eventos disruptivos. O objetivo da ferramenta é auxiliar no apoio decisão e avaliação de iniciativas de *City logistics* para o TUC do *e-commerce*.

2.6 Revisão sistemática da literatura

No período de junho de 2021 a dezembro de 2023, realizou-se uma análise bibliométrica com o objetivo de evidenciar a contribuição científica da presente tese. A combinação de tópicos utilizados para pesquisa foram: “*Simulation*” and “*e-commerce*” and “*delivery*” e “*Simulation*” and “*e-commerce*” and “*freight*” devido a sua ampla utilização nas pesquisas sobre a simulação aplicada no TUC do *e-commerce*. As bases de dados consultadas foram: *Scopus* e

Web of Science. A escolha das bases de dados se deu devido ao seu grau de relevância dentro do ambiente acadêmico, visto que ambas, contêm periódicos multidisciplinares reconhecidos internacionalmente (HERCULANO E NORBERTO, 2012; SILVA *et al.*, 2020). Os mesmos autores ainda destacam a relevância da base de dados *Scopus*, considerada a maior base de artigos científicos e resumos. A Tabela 2 mostra o número de periódicos encontrados em cada uma das bases de dados. Buscou-se por artigos que continham a combinação dos tópicos pesquisados em seu título, *abstract* ou *key-words*:

Tabela 2- Análise Bibliométrica

BASES	WOS	SCOPUS	TOTAL
<i>Simulation, e-commerce e delivery</i>	131	209	366
<i>Simulation, e-commerce e freight</i>	36	46	

Os 366 artigos publicados em periódicos foram analisados e 165 foram descartados por estarem duplicados. Destes, 157 artigos foram selecionados para a avaliação qualitativa. Para essa avaliação, foi realizada a leitura do título, *abstract*, objetivos, métodos, resultados e discussões dos 157 artigos, com o objetivo de filtrar e/ou excluir trabalhos que não guardavam relações com as questões chave de pesquisa. Após essa etapa, 108 foram selecionados para a realização de extração de dados. Os dados desses artigos foram então extraídos e levados para uma *planilha eletrônica* para análise.

O propósito de realizar esta análise é elaborar um panorama sobre as pesquisas em TUC do *e-commerce* que utilizam a modelagem e simulação, indicando desdobramentos e evidenciando tendências e relações de integração. Para analisar essas relações e tendências a partir das discussões presentes nos periódicos amostrados, foram definidas três questões de pesquisa:

Q1: Como as pesquisas sobre o TUC do *e-commerce* tem evoluído ao longo dos anos?

Q2: Quais os principais temas abordados pelos artigos envolvendo a simulação do TUC do *e-commerce*?

Q3: Qual o tipo de simulação usada nas aplicações?

2.6.1 Evolução das pesquisas

As publicações incluídas na amostra final retornaram 108 publicações em um período de 13 anos. O número de publicações ao longo dos anos pode ser observado na Figura 3.

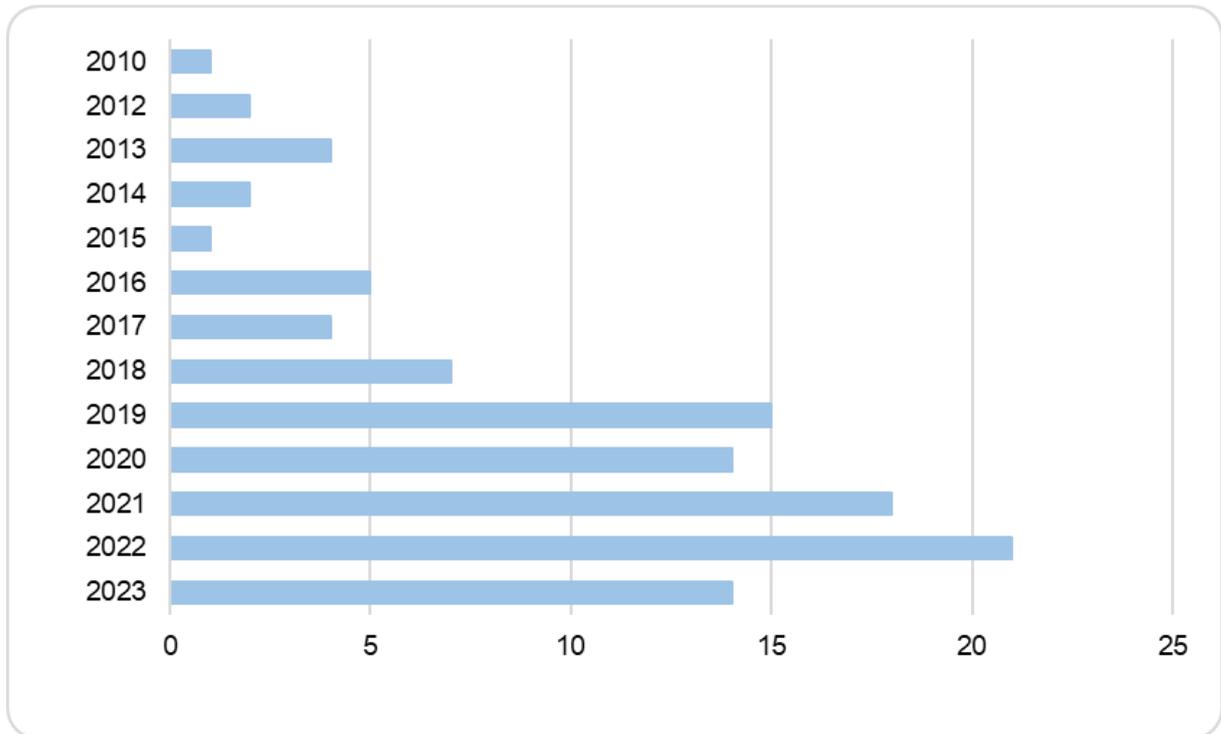


Figura 3- Artigos Publicados por Ano

Observou-se um aumento substancial de publicações nos últimos quatro anos. Entre 2018 e 2023 foram publicados 89 artigos, o equivalente a 82% de toda a publicação. Em seis anos, o número de artigos representou mais de dois terços do total. Nos anos de 2010 e 2017 houve uma produção incipiente, 19 trabalhos foram publicados (18%). Este resultado pode ser atribuído ao crescimento do *e-commerce* nos últimos anos e ao interesse dos pesquisadores em compreender o comportamento do TUC utilizando ferramentas computacionais. A evolução substancial no número de publicações denota a importância dessas ferramentas para compreender e melhorar o desempenho do TUC do *e-commerce*. Outro fator que pode explicar este crescimento do *e-commerce* é a evolução das tecnologias da informação. A grande popularização dos *smartphones*, o acesso à internet e a divulgação em meios digitais aumentaram as vendas pelos canais eletrônicos, gerando segurança para os clientes e possibilitando a pesquisa de preços e vantagens para produtos do *e-commerce*. Entretanto, esse

crescimento também gerou impactos sobre o ambiente urbano devido ao aumento da circulação de veículos de cargas nas cidades, despertando assim, o interesse dos pesquisadores pelo tema.

Embora o aumento de estudos voltados ao tema também coincida com os últimos três anos, marcados pela pandemia do vírus SARS-CoV-2, poucos dos estudos analisados mencionam, buscam compreender ou discutir o tema (ERIC *et al.*, 2023; MAVI *et al.*, 2022; SAKAI *et al.*, 2022; BUDEI RAI *et al.*, 2022; MILEWSKI *et al.*, 2021; HOLGUÍN-VERAS *et al.*, 2023). Essa lacuna na literatura ainda pode ser mais bem explorada.

A maioria dos estudos busca otimizar medidas de impacto ambiental (por exemplo, emissões de gases de efeito estufa, distância, consumo de combustível, carga de veículos, poluição, quilômetro vazio) e/ou medidas econômicas (por exemplo, custo e lucro). Poucos estudos buscam otimizar o impacto social (por exemplo, acessibilidade, confiabilidade, saúde e segurança, congestionamento). As decisões típicas incluem o uso de transportes mais sustentáveis, otimização dos custos e do tempo de entrega, roteirização, terceirização das entregas por meio de logística colaborativa e sistemas híbridos de transporte.

Quando são considerados os aspectos de impacto social associados à qualidade de vida das pessoas, infraestrutura e riscos à saúde por ruídos e acidentes, podemos constatar que as políticas públicas e os sistemas logísticos de última milha nem sempre estão alinhados. Muitas autoridades municipais estão migrando para novos modelos de mobilidade com opções não poluentes, como bicicletas e veículos elétricos para contornar esses problemas (RAJESH *et al.*, 2020; DE LA TORRE *et al.*, 2021; MOHAMMAD, *et al.*, 2023). No entanto, tais políticas entram em conflito direto com os atuais sistemas de logística de última milha, (que fazem o uso mais intenso de veículos particulares) e com os interesses dos principais *stakeholders* envolvidos. Portanto, faz-se necessária a colaboração entre as diferentes partes interessadas para alinhamento de objetivos e a busca de iniciativas para o TUC, além de medidas de planejamento e monitoramento de conformidade.

De acordo com Milewski *et al.* (2021) é fundamental analisar todas as soluções potenciais para os diferentes *Stakeholders* envolvidos e isso representa o primeiro passo para projetar com sucesso uma estratégia de logística urbana. O desempenho nas áreas de mobilidade e planejamento urbano precisa ser melhorado (ALVES *et al.*, 2019). A implementação das iniciativas de *City logistics* e das medidas de tráfego associadas não pode ser bem-sucedida sem uma compreensão dos interesses dos diferentes *stakeholders* envolvidos. Caso contrário, esta implementação pode ser desincentivada. Alguns autores chegam a sugerir que o poder público

deve assumir o papel de intermediário entre as partes interessadas, agindo como mediador e não como autoridade fiscalizadora (DE LA TORRE *et al.*, 2021; ARNOLD *et al.*, 2018).

2.6.2 Temas das pesquisas

Em relação aos principais temas dos artigos, 69,9% analisam alguma iniciativa de *City logistics*, 21,8% realização da roteirização das entregas e 8,3% realizaram alguma simulação de tráfego. Para duas últimas categorias mencionadas, a pesquisa acadêmica em TUC tem-se concentrado na exploração de conjuntos de dados históricos de tráfego, visando otimizar rotas por meio de entregas com janelas de tempo (CLEOPHAS *et al.*, 2014; XIAO *et al.*, 2013; XU *et al.*, 2014; YANG E STRAUSS 2017; FU *et al.*, 2017; SOPHA *et al.*, 2016; WANG *et al.*, 2017), deixando assim, outros pontos de vista a serem estudados. Esses estudam datam, em sua maioria, aos primeiros 7 anos do período considerado nesta pesquisa e usam algoritmos e/ou equações matemáticas para simular a otimização de rotas, realizando uma simulação estática para obter economia no tempo de viagem, nas distâncias percorridas, no uso de veículos, no tempo de espera, no consumo de energia e, por consequência, nas emissões de CO₂. A ideia geral é que a utilização de rotas otimizadas acarretaria não só um impacto ambiental positivo, mas também uma maior eficiência operacional (impacto econômico). No entanto, as projeções baseadas nas tendências atuais de pesquisa apontam para um comportamento completamente oposto por parte dos provedores do serviço de transporte.

A maioria dos trabalhos lidam com alguma iniciativa de *City logistics*. As mais estudadas estão sintetizadas na Quadro 1. Podemos observar que as iniciativas de *City logistics* para o TUC do *e-commerce* têm recebido bastante atenção nas pesquisas durante os últimos anos (DE LA TORRE *et al.*, 2021; IVANOV, 2020; ALVES *et al.*, 2019). No entanto, seus efeitos precisos sobre os custos operacionais e externalidades negativas nem sempre são claros e os resultados, geralmente, são baseados em estimativas analíticas ou resultados piloto, não evidenciando as implicações que estas iniciativas podem trazer para todos os envolvidos no processo ou para subsidiar a tomada de decisão.

Quadro 1– Iniciativas de *City logistics* estudadas

Iniciativa	Autores
<i>Delivery Locker/Collection Delivery Point (DLs/CDPs)</i>	Eric <i>et al.</i> (2023); Alves <i>et al.</i> (2023); Calabrò <i>et al.</i> (2023); Alves <i>et al.</i> (2022); Leung, Ouyang e Huang (2023); Merkert; Bliemer e Fayaz (2022); Sakai <i>et al.</i> (2022); Sawik <i>et al.</i> (2022); Bean and Cilliers (2022); Alves <i>et al.</i> (2019); Arnold <i>et al.</i> (2018); Gonzalez <i>et al.</i> (2012); González <i>et al.</i> 2020; Kiouisis-Vasileios <i>et al.</i> (2019); Milewski <i>et al.</i> (2021); Perboli <i>et al.</i> (2018); Suwatharachaitiwong <i>et al.</i> (2020); Zhang <i>et al.</i> (2018); Anna Reiffer <i>et al.</i> (2021); Vazquez-Noguerol <i>et al.</i> (2021); Melkonyan <i>et al.</i> (2020); Li e Liu, (2010);
<i>Centro de Consolidação/Distribuição Urbana (CCU/CDU)</i>	Ballano <i>et al.</i> (2023); Calabrò <i>et al.</i> (2022); Cruz-Mejia e Richard Eglese (2013); Diaz <i>et al.</i> (2022); Difrancesco <i>et al.</i> (2021); Song <i>et al.</i> (2019); Kim <i>et al.</i> (2019); Nogueira <i>et al.</i> (2022); Orenstein e Raviv (2022); Ranathunga; Wijayanayake e Niwunhella (2022); Reiffer <i>et al.</i> (2021); Brasileiro e Chiuffa (2018); Cruz-Mejia e Richard Eglese (2013); Difrancesco <i>et al.</i> (2021); Kim <i>et al.</i> (2019); Serrano-Hernandez <i>et al.</i> (2021); Shen (2019); Vazquez-Noguerol <i>et al.</i> (2021); Wei <i>et al.</i> (2021); Zhiqiang-Niu <i>et al.</i> (2020); Marccuci <i>et al.</i> (2021)
<i>Entregas por veículos autônomos/drones</i>	Arora <i>et al.</i> (2022); Lee <i>et al.</i> (2022); De La Torre <i>et al.</i> (2021); Heshmati <i>et al.</i> (2018); Khalid e Chankov (2020); Miler <i>et al.</i> (2021); Rizk e Awad (2019); Wu <i>et al.</i> (2021); Yang <i>et al.</i> (2016); Yetis e Karakose (2021); Zhu <i>et al.</i> (2020); Nguyen <i>et al.</i> (2023); Hori <i>et al.</i> (2023); Zhang <i>et al.</i> (2023); Ballano <i>et al.</i> (2023); Nguyen <i>et al.</i> (2023); Abualola <i>et al.</i> (2023); Straubinger <i>et al.</i> (2023)
<i>Crowdshipping</i>	Ghaderi <i>et al.</i> (2022); Zehtabian; Larsen e Wøhlk (2022); Melkonyan <i>et al.</i> (2020); Guo <i>et al.</i> (2019); Kusuma (2018); Nahry e Ayu (2021); Pan <i>et al.</i> (2015); Ren <i>et al.</i> (2021); Simoni <i>et al.</i> (2020); De La Torre <i>et al.</i> (2021); Abualola <i>et al.</i> (2023)
<i>Distribuição colaborativa</i>	Bae <i>et al.</i> (2022); Kusuma e Kallista (2022); Aktas <i>et al.</i> (2020); Inoue <i>et al.</i> (2019); Wang e Cao (2021); Xu e Yang (2013); Zhang <i>et al.</i> (2018); Heshmati <i>et al.</i> (2018)
<i>Tarifação e incentivos fiscais</i>	Liu <i>et al.</i> (2019); Papadopoulos <i>et al.</i> , (2020); Taniguchi <i>et al.</i> (2012); De La Torre <i>et al.</i> (2021); Koch e Klein (2020)
<i>Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS)</i>	Giusti-Riccardo <i>et al.</i> (2018); Ruan e Shi (2016);
<i>Cargo bikes</i>	Ceccato e Gastaldi (2022); Rajesh <i>et al.</i> (2020); Perboli <i>et al.</i> (2018); De La Torre <i>et al.</i> (2021); Arnold <i>et al.</i> (2018); Zhang <i>et al.</i> (2018)

A maioria dos trabalhos simula a implantação de DLs/CDPs e observa-se que essa iniciativa vem ganhando destaque nas pesquisas nos últimos anos. O uso dessa iniciativa apresenta um grande potencial para reduzir os problemas de entrega em domicílio do comércio eletrônico, em termos de redução de custos, quilometragem percorrida, reentregas, número de

paradas e aumento de consolidação de cargas (ALVES *et al.*, 2023). No entanto, segundo alguns estudos, isso pode impactar os hábitos e o comportamento do consumidor. Alguns autores examinam a aceitação potencial das pessoas de armários de coleta e os fatores que podem aumentá-la (ARNOLD *et al.*, 2018, CARDENAS *et al.*, 2016 e OLIVEIRA *et al.*, 2019; Alves *et al.*, 2022; 2023). Os estudos concluem que a segurança, localização e rastreabilidade são fatores-chave para se planejar uma rede de pontos de coleta. Alguns estudos também afirmam que mais trabalhos precisam ser realizados para conscientizar os consumidores sobre as vantagens de tal serviço, comunicando os impactos ambientais e sociais envolvidos, bem como a flexibilidade que ele oferece, para aumentar seu uso por parte dos clientes (ARNOLD *et al.*, 2018; MILEWSKI *et al.*, 2021; ALVES *et al.*, 2023). Esses estudos chegam também a sugerir o incentivo do uso desse sistema com descontos ou mesmo penalizando as entregas em domicílio. Poucos trabalhos avaliam esses benefícios sobre a visão das transportadoras e sua aplicação prática em cidades brasileiras (OLIVEIRA *et al.*, 2019; ALVES *et al.*, 2019; ALVES *et al.*, 2022; MASTEGUIM E CUNHA, 2022).

Os demais trabalhos avaliam também iniciativas como: entregas por veículos autônomos/drones, simulação de tráfego e geração de viagens, *crowdshipping*, distribuição colaborativa, tarifação e incentivos fiscais, ITS e *cargo bikes*. Essas iniciativas, também demonstram o potencial de melhoria dos processos do TUC, dentre outras vantagens. Entretanto, verifica-se que elas apresentam algumas limitações, como por exemplo, a limitação da distância percorrida para realizar entregas, tempo da entrega, peso máximo das mercadorias, legislações vigentes, dependência de investimento em tecnologia e manutenção, segurança, entre outros.

Observou-se que a modelagem e simulação podem apoiar os tomadores de decisão na compreensão e no planejamento das operações e na análise do desempenho dos sistemas de distribuição urbana. Isso pode lhes permitir analisar, comparar e formular políticas integradas para melhorar a eficiência e reduzir suas externalidades negativas do TUC. Entretanto, a maioria das instâncias na literatura baseia-se na generalização de instâncias clássicas, muitas vezes, não criadas para aplicações urbanas, ou em dados artificiais, ou seja, dados não provenientes de quaisquer conjuntos de dados históricos ou empíricos. Assim, a validação de modelos e métodos torna-se mais difícil, não sendo os resultados diretamente comparáveis com sistemas reais. Mesmo quando algumas fontes de dados se tornam disponíveis, não há uma maneira padrão de combinar dados coletados de fontes diferentes e, a partir delas, gerar novas instâncias para ambientes urbanos. Quando dados reais se tornam disponíveis, alguns outros

desafios são observados como: a disponibilidade de um conjunto de dados finito, a necessidade de anonimizá-los ou da combinação de dados reais com distribuições empíricas.

Além disso, para os casos em que ocorre a análise de iniciativas de *City logistics*, as diferentes categorias de *stakeholders* e seus objetivos raramente são consideradas em conjunto para a busca de alguma solução (ALVES *et al.*, 2022). Essas limitações, segundo Silva (2019), ocorrem pela indisponibilidade de dados completos para todos os envolvidos, pois: 1) dada uma área urbana, a coleta de dados reais associados a todas as quatro partes interessadas geralmente requer muito tempo e/ou experiência para ser realmente implementada e; 2) observa-se a dificuldade de combinar/reutilizar dados existentes, pois mesmo que os estudos existentes possam fornecer dados de um ou mais interessados, ainda não há uma maneira trivial de se combinar esses dados advindos de fontes diferentes. Os estudos que envolvem aplicações reais são mais específicos e não envolvem o TUC como um todo. Esses estudos são focados em resolver e/ou compreender um problema local específico (ALVES *et al.*, 2023; MUÑOZ-VILLAMIZAR *et al.*, 2021; MARCUCCI *et al.*, 2021; GEE *et al.*, 2019; SONG *et al.*, 2019).

2.6.3 Tipologia da simulação

A tipologia da simulação geralmente considera a natureza do sistema que se deseja modelar e simular. Vários pesquisadores na área convergem quanto aos tipos de simulação (BANKS *et al.*, 2010; MACAL e NORTH, 2013; SARGENT, 2013; SOKOLOWSKI e BANKS, 2009). Assim, foram identificados os seguintes tipos de simulação: Simulação a Eventos Discretos (SED), Simulação de Tráfego (ST), Simulação de Monte Carlo (SMC), Simulação Baseada em Agentes (SBA) e a Simulação Combinada ou híbrida (SCO ou SH), que pode mesclar a aplicação de dois ou mais métodos de simulação. A Figura 4 ilustra os tipos de modelagem e simulação, em percentuais, usados no TUC do *e-commerce*.

A SBA pura é o tipo de abordagem de simulação mais empregada dentre aquelas que tiveram a definição clara dentro dos trabalhos (20%), seguida pela SMC (12%) e SCO/SH (10%). Observando os resultados, é possível constatar que SBA vem ganhando um grande espaço dentro da comunidade científica/acadêmica, como destaca Alves *et al.* (2019), pois possibilita a integração de metodologias para todos os *Stakeholders* (ou seja, fornecedores, operadores logísticos, varejistas e planejadores de cidades) em logística urbana. A SBA utilizada na maior parte dos trabalhos analisados, busca analisar iniciativas de *City logistics* para o TUC do *e-commerce*. Basicamente, os trabalhos que envolvem esse tipo de simulação, se justificam pelo dinamismo que o *e-commerce* trouxe às relações de consumo, destacando e

estudando mecanismos que sejam capazes de tornar as operações logísticas mais eficientes em várias perspectivas, como a financeira e ambiental, por exemplo. Já a SMC é utilizada para estimar demanda futura, planejar rotas eficientes, avaliar capacidade de infraestrutura, analisar riscos e orientar investimentos em infraestrutura. Os trabalhos que empregam a SMC, seguem uma linha de pesquisa semelhante aos que adotam a SBA, em que, por meio de análise de dados e iniciativas, buscam a elaboração de cenários comparativos para avaliar iniciativas com o potencial de tornar as operações do TUC mais eficientes.

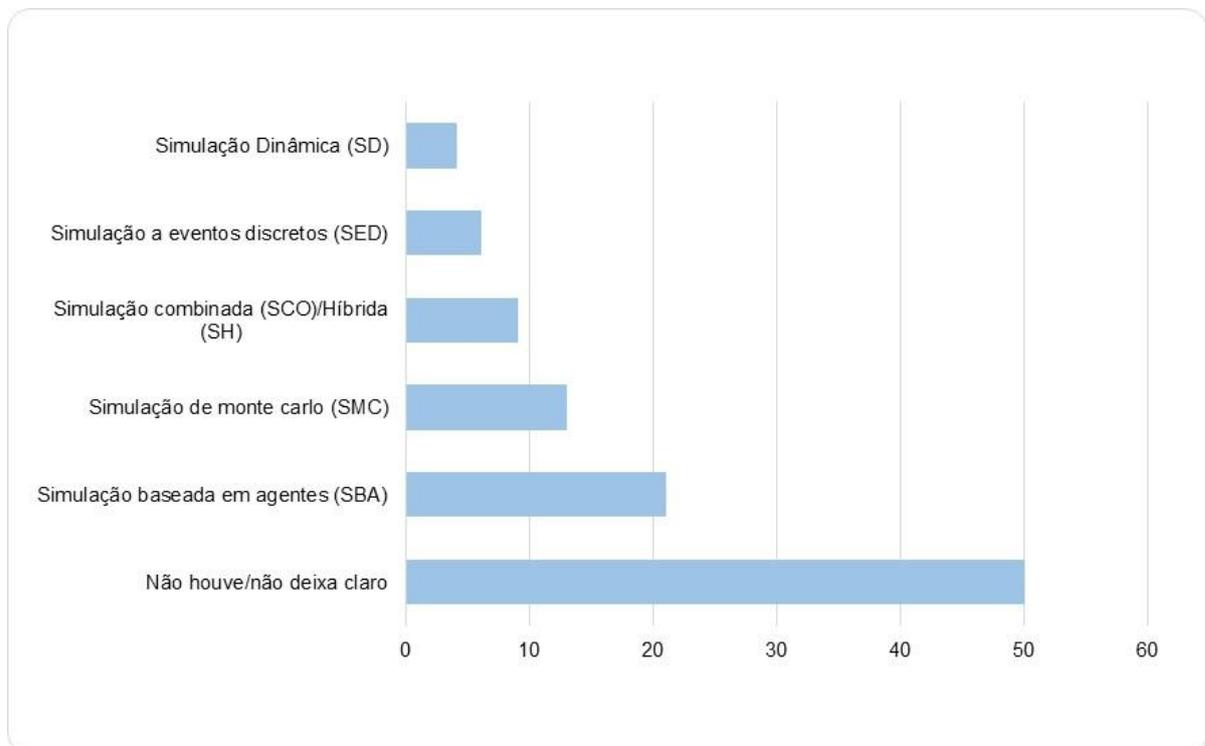


Figura 4- Tipo de Simulação

Observou-se que o uso de SCO/SH também vem ganhando destaque na comunidade acadêmica. A SH é uma aplicação combinada de abordagens de simulação e/ou métodos e técnicas de disciplinas como computação aplicada, engenharia, ciência de dados e pesquisa operacional (BAE *et al.*, 2022). Este tipo de abordagem de simulação defende o uso de abordagens interdisciplinares, incluindo paradigmas de pesquisa interdisciplinar, estruturas, metodologias, técnicas e ferramentas para um ou mais estágios de um estudo de simulação (por exemplo, modelagem conceitual, implementação de modelo, execução de modelo e desenvolvimento de cenário) com o objetivo de criar a melhor representação possível do sistema de interesse. Bae *et al.* (2022) enfatizaram a importância de usar a simulação híbrida

(SH) para modelar sistemas logísticos, permitindo que pesquisadores modelem as particularidades de um determinado sistema, ou sistemas de difícil análise, o que a SED ou a SBA, não poderiam fazer sozinhas. Esses métodos, quando combinados, levam a vantagens de modelagem de sistemas logísticos, representando mais fielmente sistemas reais e auxiliando na avaliação de iniciativas para o TUC do *e-commerce* (ALVES *et al.*, 2019). Essas combinações também podem reduzir tanto o alto grau de complexidade dos modelos simulados, quanto os tempos computacionais relativamente altos necessários para analisar novos cenários. Embora a SH ainda seja pouco utilizada em estudos de transporte e logística, esses mesmos autores apontam que esse tipo de simulação é um campo a ser explorado. Observa-se que sua utilização vem crescendo ao longo dos últimos anos, chegando a percentuais próximos ao da SMC. Alguns autores destacam a necessidade de sua utilização para alcançar sistemas de transporte sustentáveis ao longo do tempo (DE LA TORRE *et al.*, 2021; IVANOV, 2020).

2.6.4 Ineditismo da tese

Observou-se durante a revisão de literatura para esta tese que as discussões sobre o TUC do *e-commerce* durante a eventos disruptivos ainda são recentes, nenhum trabalho apresentou uma ferramenta de apoio à decisão que possa ser utilizada pelas transportadoras durante eventos disruptivos, utilizando SH. Embora haja muitas pesquisas sobre o TUC do *e-commerce*, poucas abordam especificamente os eventos disruptivos e elas não mencionam ou exploram métodos de apoio a decisão. Uma ferramenta de apoio à decisão, poderia ajudar a preencher essa lacuna, fornecendo informações valiosas sobre como as transportadoras do *e-commerce* podem se preparar e responder a esses eventos para minimizar o impacto sobre as entregas. A literatura ainda necessita de estudos mais detalhados sobre os impactos destes eventos sobre as operações de transporte e de metodologias que apoiem a tomada de decisões e possibilitem a avaliação de iniciativas de *City logistics*, para todos os *Stakeholders* envolvidos no processo.

Por meio da análise das principais bases de artigos acadêmicos, foi possível constatar o caráter inédito da presente tese, que deixará como contribuição científica uma ferramenta, desenvolvida a partir de um modelo de SH, para apoio à decisão durante eventos disruptivos. Com esse modelo, pretende-se fornecer uma ferramenta para as transportadoras e *Stakeholders* do *e-commerce*, que possibilite a análise dos impactos causados por eventos disruptivos sobre o TUC e para a avaliação de iniciativas *City logistics*, por meio da simulação de cenários.

3 MÉTODODE PESQUISA

Este capítulo classifica a presente pesquisa e descreve os procedimentos metodológicos adotados para alcançar os objetivos propostos neste trabalho.

3.1 Classificação da pesquisa

De acordo com a classificação apresentada por Mello, Martins e Turrioni (2013), a presente pesquisa é classificada quanto à sua natureza como aplicada, pois, aborda um problema real, que é a resiliência dos sistemas de transportes do *e-commerce* durante eventos disruptivos, com o objetivo de desenvolver uma ferramenta de apoio à decisão para o TUC que possa ser utilizada durante esses eventos. Em relação aos seus objetivos, é caracterizada como uma pesquisa normativa, pois propõe e analisa uma iniciativa referenciada na literatura para o TUC do *e-commerce*, a fim de apresentar uma solução para o problema estudado (BERTRAND E FRANSOO, 2002).

Em relação à abordagem do problema, classifica-se como quantitativa, uma vez que os dados de entrada e saída da ferramenta são representados de forma mensurável em dimensões pré-definidas. O método utilizado para o desenvolvimento desta tese foi a modelagem e simulação (BERTRAND E FRANSOO, 2002), utilizando um *software* computacional. Dentro do objetivo proposto neste trabalho, é o método mais adequado, pois permite o apoio à tomada de decisão em tempo real e a análise de implantação de medidas de *City logistics* para as entregas do *e-commerce*, por meio da simulação de cenários comparativos, sem que haja a necessidade de intervir no sistema real.

A Figura 5 destaca a pesquisa nas quatro classificações apresentadas em relação a sua natureza, abordagem, objetivos e método, conforme propõe (MIGUEL; MORABITO E PUREZA, 2009).

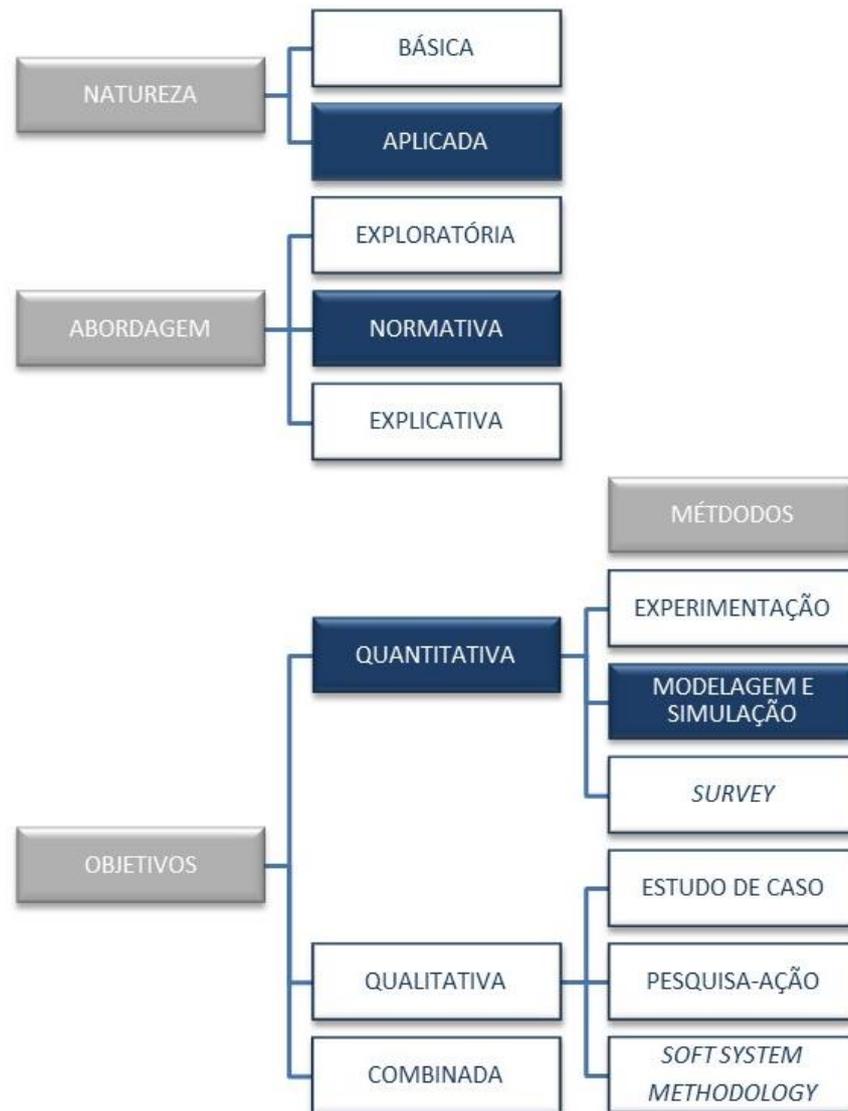


Figura 5- Classificação da pesquisa

3.2 Etapas de desenvolvimento do DISRUPSIM

A primeira etapa deste estudo consistiu em mapear as operações das transportadoras e compreender os desafios enfrentados pelo transporte urbano de cargas durante eventos disruptivos por meio da aplicação de um questionário. O questionário continha algumas perguntas sobre o funcionamento de suas operações, infraestrutura e sobre os principais obstáculos enfrentados pelas transportadoras de *e-commerce* para lidar com o aumento das entregas, tais como a necessidade de contratação de mão de obra adicional, aquisição de novos veículos e medidas de proteção adotadas durante o processo de entrega durante a pandemia da COVID-19 (evento disruptivo recente). Ao todo, três transportadoras aceitaram participar desta

etapa da pesquisa. Com base na compreensão dos desafios e mapeamento das operações, foi desenvolvido o DISRUPSIM, utilizando como método a modelagem e simulação.

Posteriormente, o DISRUPSIM foi aplicado em uma situação real para sua validação. Com os resultados foi possível avaliar os impactos gerados sobre a quilometragem percorrida, custos, emissão de poluentes, número de viagens e capacidade de carga das transportadoras durante um evento disruptivo. As análises, incluíram a avaliação da eficácia da ferramenta para mensurar os impactos dos eventos disruptivos, a redução de custos operacionais e o aumento da eficiência energética da transportadora.

Com base nos resultados analisados, foi analisada a implantação de uma iniciativa de *City logistics* para o TUC do *e-commerce*, os DLs, visando amenizar os impactos gerados sobre as operações de transporte. Isso incluiu, a simulação de novos cenários para avaliação dos resultados, a utilização do ambiente GFA do ALX e uma análise de sensibilidade, para auxiliar na implementação dessa iniciativa.

3.3 Etapas de modelagem e simulação

Tendo em vista que o desenvolvimento da ferramenta deste estudo baseia-se em modelagem e simulação, a metodologia para o desenvolvimento do DISRUPSIM seguiu a estrutura proposta por Chwif e Medina (2014) e Banks *et al.* (2010), como apresentado na Figura 6. Apesar desta metodologia ser aplicada na maioria das vezes em estudos de SED, observou-se que ela atendeu ao desenvolvimento do método proposto neste estudo, não necessitando de adaptações. Essa estrutura é composta três etapas principais: concepção ou formulação do modelo, implementação do modelo e análise dos resultados. A primeira ou etapa permite entender o sistema a ser simulado e os seus objetivos. Isso inclui a construção do modelo conceitual, validação de tal modelo, documentação e modelagem dos dados de entrada.

A segunda etapa consiste na construção, implementação e validação do modelo computacional. O processo de verificação ocorreu em duas etapas, como realizado em estudo de Alves (2019) e sugerido por Banks *et al.* (2010). Inicialmente, realizou-se uma comparação entre a lógica e os elementos do modelo computacional com a lógica e os elementos do modelo conceitual validado. Após essa comparação, a segunda etapa foi executada utilizando o depurador do *software* de simulação para encontrar erros na lógica de modelagem e corrigi-los.

Na terceira etapa, com o modelo computacional validado, foram executados os experimentos. Nesta fase foram efetuadas várias “rodadas” do modelo, com análises de

cenários, replicações e implantação de iniciativas de *City logistics* para o TUC do *e-commerce*. Os resultados da simulação foram analisados e documentados ao longo da tese.

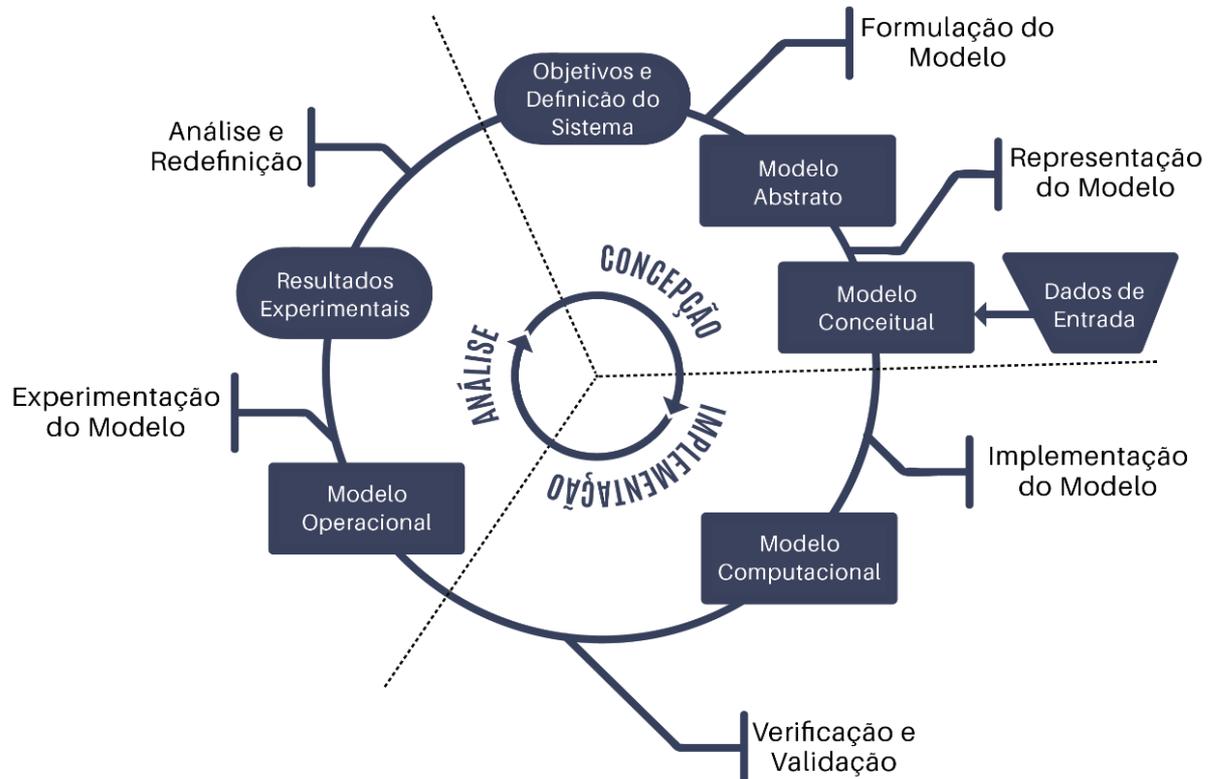


Figura 6- Etapas do processo de modelagem e simulação.

Fonte: Chwif e Medina, (2014) e Alves (2019)

Nas próximas seções são abordadas as etapas de concepção do modelo em sua base conceitual, bem como a construção e implementação do modelo computacional.

3.4 Concepção

De acordo com Robinson (2008), a modelagem conceitual consiste em uma descrição específica do modelo que será simulado, sem ainda desenvolver a programação do modelo em software específico. Essa etapa de modelagem descreve os objetivos, entradas, saídas, conteúdo, pressupostos e simplificações do modelo. Nesse estágio, uma compreensão clara do problema e a definição de objetivos são fundamentais, pois orientam a modelagem, servem como referência para a validação do modelo e guiam a experimentação (ALVES *et al.*, 2023). Determinar as limitações e o nível de detalhe do modelo é outra questão crucial (MISLEWSKI

et al., 2022). Portanto, após a definição do sistema e seus objetivos, inicia-se a construção do modelo conceitual e, posteriormente, sua validação.

3.4.1 Objetivos e definição do sistema

De acordo com a revisão da literatura demonstrada neste estudo, há uma lacuna teórica sobre como a modelagem e simulação podem ser utilizadas como ferramenta de apoio à decisão durante eventos disruptivos. O modelo proposto neste trabalho busca representar o sistema de entregas do *e-commerce* durante esses eventos. Seu principal objetivo é analisar os impactos gerados nas operações de entrega do *e-commerce*, identificando oportunidades de melhoria e estratégias para mitigar esses impactos.

3.4.2 Construção do modelo conceitual

Para desenvolver o modelo conceitual, empregou-se a técnica IDEF-SIM (*Integrated Definition Methods – Simulation*), conforme proposta por Leal *et al.* (2009) e Montevechi *et al.* (2010). Essa técnica se destaca pela sua lógica diagramática de aplicação, que visa representar fielmente a realidade ou uma aproximação dela (MONTEVECHI *et al.*, 2010). O IDEF-SIM é uma adaptação dos elementos lógicos presentes nas técnicas IDEF0 e IDEF3, especificamente voltada para a interpretação lógica em projetos de simulação. Sua principal característica é a similaridade da lógica de aplicação com aquela utilizada na implementação de modelos de simulação. Isso visa criar e diagramar um modelo conceitual do processo a ser simulado, contendo os elementos necessários para a fase subsequente de modelagem computacional. A Figura 7 ilustra a simbologia empregada na técnica IDEF-SIM.

ELEMENTO	SÍMBOLO	TÉCNICA DE ORIGEM
Entidade		IDEF3
Funções		IDEFO
Fluxo da Entidade		IDEFO e IDEF3
Recursos		IDEFO
Controles		IDEFO
Regras para fluxos paralelos e/ou alternativos	 Regra E	IDEF3
	 Regra OU	
	 Regra E/OU	
Movimentação		FLUXOGRAMA
Informação Explicativa		IDEFO e IDEF3
Fluxo de entrada no sistema		
Ponto final do sistema		
Conexão com outra figura		

Figura 7- Elementos e simbologia do IDEF-SIM.
 Fonte: Leal *et al.* (2009) e Montevechi *et al.* (2010)

As informações para a elaboração do modelo conceitual deste trabalho foram coletadas por meio de contato por e-mail e telefone com três transportadoras localizadas em cidades de grande e médio porte. O modelo considera o comportamento e a interação entre os dois agentes envolvidos no processo de entrega do *e-commerce*: (i) transportadoras e (ii) clientes.

Neste modelo, a entidade é representada pelo pedido, que é realizado pelo cliente no *e-commerce* e entra no sistema modelado por meio do fluxo de entrada. As funções e recursos utilizados são representados pelas operações dos agentes: cliente e transportadora. O fluxo da entidade é representado pelas setas do modelo. As regras de decisão (regra OU) são representadas pela entrega ou pela falha na entrega do pedido pela transportadora. O transporte do pedido para o cliente ou para um DL é representado pelo símbolo de movimentação. O sistema se encerra após a entrega do pedido. A modelagem de cada agente e suas operações é apresentada na Figura 8.

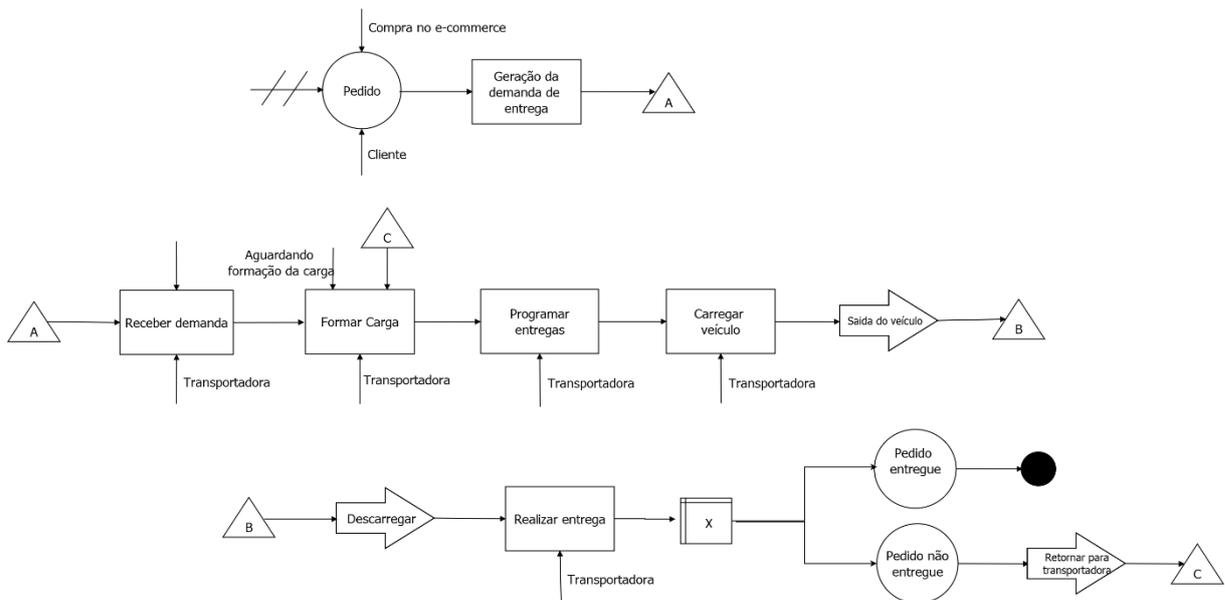


Figura 8- Modelo Conceitual (fluxo de operações genérico de uma transportadora)

O processo de simulação é iniciado com os clientes, que atuam como disparadores da demanda ao realizar suas compras nas lojas do *e-commerce* e aguardam a entrega.

A transportadora recebe as demandas de entregas de mercadorias, as processa e separa os pedidos. Cada pedido possui um determinado volume e peso e um endereço dentro da região de entregas. Após a chegada dos pedidos, inicia-se a programação das entregas para o dia seguinte. A transportadora também gerencia um número específico de veículos para realizar as entregas. O ponto de partida é o centro de distribuição (CD) da transportadora. Ao sair do CD, os veículos realizam as entregas conforme a programação e retornam ao CD. Por fim, após retornarem ao CD, aguardam até que outras cargas sejam destinadas a eles, até o final do dia de trabalho.

3.4.3 Validação do modelo conceitual

Para verificar a adequação do modelo desenvolvido em relação ao sistema real, foi empregada a validação face a face, conforme proposta por Sargent (2013). Essa abordagem consiste na avaliação dos requisitos relacionados nas etapas de implementação do framework proposto por Robinson (2008), juntamente com a análise da diagramação do IDEF-SIM. Segundo Sargent (2013), a validação face a face é uma das técnicas mais comumente utilizadas para esse propósito, devido à sua ampla aplicação encontrada na literatura. Esta afirmativa é confirmada pela sua utilização em diversos trabalhos (ALVES *et al.*, 2019; BRASILEIRO; CHIUFFA, 2018; LOPES, 2017; SOPHA, SIAGIAN e ASIH, 2016). Nessa técnica, o modelo

conceitual é submetido à avaliação de especialistas que possuem conhecimento sobre o sistema modelado. Esses especialistas têm a responsabilidade de determinar se o modelo conceitual e/ou seu comportamento são coerentes com a realidade

Neste trabalho, os especialistas avaliaram se as ações e interações de cada agente e seus processos modelados estão coerentes com a realidade. Esses especialistas são pesquisadores da área de logística urbana e pessoas diretamente envolvidas nos processos de entrega de algumas empresas de transporte. Após a apresentação do modelo conceitual desenvolvido e da explicação da lógica de interação dos agentes e funcionamento das operações, comparados as operações reais de uma transportadora, eles afirmaram que o modelo representa de maneira adequada o sistema estudado. Após esta validação, o modelo conceitual, serviu como base de dados para a etapa de construção do modelo computacional.

Após a validação do modelo conceitual, a próxima fase é a implementação é composta pelos seguintes passos: Construção do Modelo Computacional, Verificação e Validação do Modelo Computacional.

3.4.4 Construção do Modelo de Simulação

Após a construção do modelo conceitual, passou-se para a implementação em ambiente computacional para desenvolvimento do DISRUPSIM. A partir das classificações sobre modelos de simulação apresentadas anteriormente, o modelo desenvolvido neste estudo é caracterizado como dinâmico e estocástico. Ele utiliza variáveis discretas e contínuas para representar um sistema real e combina SED e SBA em uma abordagem de simulação híbrida, para representar o comportamento da demanda de entregas do *e-commerce* durante um evento disruptivo.

O modelo computacional foi desenvolvido e implementado no *software Anylogistix®* (ALX) (IVANOV, 2021). O *software* possui quatro ambientes de trabalho, são eles:

- *Green Field Analysis ou Análise de Centro de Gravidade (GFA)*;
- *Network Optimization ou Otimização de redes de transporte (NO)*;
- *Simulation ou Simulação (SIM)* e;
- *Transportation Optimization ou Otimização de Transporte (TO)*.

Neste trabalho foram utilizados os ambientes SIM e GFA do ALX. O ambiente SIM foi utilizado para modelagem dos agentes, das operações da transportadora e simulação dos cenários. Esse ambiente oferece a possibilidade de combinação de diferentes abordagens de

simulação para representar o sistema estudado. A simulação pode ser de suporte estratégico e operacional, sendo assim, uma importante ferramenta para apoio à decisão. No que se refere ao apoio estratégico, ela pode oferecer possibilidades de análise de decisões relativas ao planejamento de transporte e abastecimento. Já o suporte operacional, pode incluir o apoio à decisão para escolher alternativas em situações inesperadas, como riscos operacionais de flutuações de demanda ou riscos de interrupção de abastecimento.

O ambiente GFA ou também chamado de análise de centro de gravidade foi utilizado para localização dos DLs nos cenários comparativos. Esse ambiente é utilizado para definir os locais ideais de novas instalações. Nele, um alto nível de abstração com um número mínimo de detalhes é utilizado. Os dados existentes, como localização dos clientes, demanda, número e localização das instalações e/ou distâncias de serviço, são utilizados como entradas do modelo. Os resultados da simulação são locais aproximados e ideais para instalações de produção ou armazenamento, nos quais o custo de todo o transporte é minimizado.

A Figuras 9 apresenta o ambiente de trabalho do ALX.

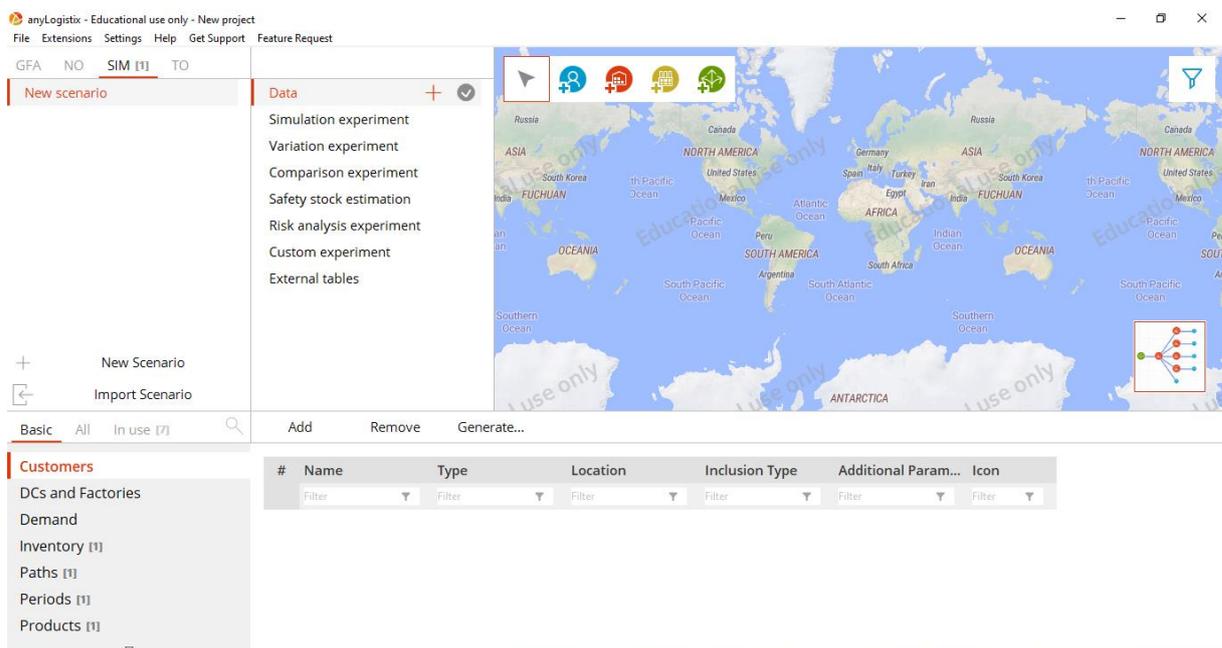


Figura 9- Ambiente de trabalho do ALX

Embora o *software* seja voltado para simulações da Gestão da Cadeia de Suprimentos (GCS), a ferramenta apresenta recursos para análises e avaliação do transporte em seus diferentes níveis ao longo da cadeia logística, incluindo a última milha. O *software* combina abordagens de otimização analítica com tecnologias inovadoras de simulação para oferecer um

conjunto abrangente de ferramentas para análises de operações logísticas de ponta a ponta. Ao combinar diferentes abordagens de simulação e otimização, possui um conjunto de ferramentas para enfrentar os desafios encontrados nas operações, permitindo o planejamento e análise dessas operações. Além disso, utiliza o solucionador CPLEX para resolver problemas complexos com várias variáveis. O CPLEX é um software de otimização matemática que é amplamente utilizado para resolver problemas de programação linear, inteira e quadrática. No contexto do ALX, o CPLEX é empregado para encontrar as melhores soluções possíveis para problemas de design, planejamento e operações da cadeia de suprimentos, levando em consideração diversas restrições e objetivos. Isso permite que o ALX forneça insights valiosos e recomendações para melhorar a eficiência e o desempenho da cadeia de suprimentos de uma empresa. Também tem como base de programação o *software AnyLogic* da mesma fabricante, que também permite diferentes abordagens de simulação, como a SED, SBA e SD e possibilita sua interação com o mesmo, para personalizar a estrutura e os parâmetros do modelo. A implantação de iniciativas de *City logistics*, também podem ser analisadas por meio do uso do ALX, sendo uma possível solução para amenizar os desafios enfrentados nas entregas *do e-commerce* durante eventos disruptivos. Isso define, portanto, a escolha desse *software* para ser utilizado neste estudo.

O modelo apresentado neste trabalho se classifica como híbrido, pois utiliza de SBA e SED. Os agentes conhecidos como “clientes” realizam as ações de acionar a demanda e aguardar a entrega em domicílio, interagindo com a transportadora por meio da geração de demanda para as entregas. Já a agente “transportadora” recebe a demanda do cliente e inicia seus processos de formação de carga, carregamento do veículo, listagem de endereços a serem visitados e saída do veículo para entrega, durante todo o horário de expediente. Essas operações de transporte são modeladas discretamente dentro do agente “transportadora”. Além disso, o *software* também apresenta, dentre suas funcionalidades, uma interface com mapas GIS (*Geographic Information System*) fornecidos pelo *OpenStreetMap*, que é um kit de ferramentas de visualização geoespacial.

A funcionalidade GIS permite que a simulação contenha dados georreferenciados e, ainda, é capaz de inserir agentes neste meio, onde pode-se recuperar, sempre que necessário, a localização no mapa de um agente, movê-lo com a velocidade especificada de um local para outro e ao longo das rotas existentes (IVANOV, 2019). A implementação, baseada no *OpenStreetMap*, permite localizar seus componentes no mapa. Suas projeções são componentes que lidam com as traduções entre coordenadas de latitude e longitude (IVANOV, 2019). No

modelo computacional implementado, o CD da transportadora possui uma localização fixa no mapa. Os clientes são alocados aleatoriamente pela região de estudo e os veículos possuem a capacidade de escolher uma rota e se movimentar por ela para realizar as entregas. Todas essas informações são modeladas nas tabelas *Customers*, *DC*, *Factories* e *Localions* do *software*. Para aplicação do modelo deve-se realizar a definição da dimensão temporal (definição do período a ser estudado), localização do centro de distribuição da transportadora (informações geográficas), demanda dos clientes, dados sobre a frota da transportadora (número de veículos, capacidade de carga, velocidade, emissões de CO₂*, gasto médio com combustível de cada veículo), pedidos entregues (peso e volume); regiões atendidas (bairros, distritos e cidades atendidos) e planejamento das entregas (programação e política de atendimento).

Para delimitação da frota, inicialmente são informados dois tipos de veículos: um caminhão e uma *pickup* com capacidade de transporte de 10 e 7 m³, respectivamente. Esses parâmetros são inseridos no modelo utilizando as tabelas *Fleets* e *Vehicles* do *software* e estão de acordo com as informações obtidas nos manuais desses veículos. Cada cliente possui uma demanda que pode ser informada de acordo o histórico de dados disponíveis ou por meio de distribuições estatísticas, utilizando a tabela *Demand* do ALX.

Para modelagem das conexões entre a transportadora e os clientes, utilizou-se a tabela *Paths*, de modo que os veículos da transportadora atendessem a todos os clientes. É importante ressaltar que os caminhos definidos nessa tabela do *software* são unidirecionais. Para definir um caminho na direção de deslocamento reverso do veículo, deve-se criar uma nova entrada na tabela. Nesse sentido, foram criados caminhos de ida e volta entre a transportadora e todos os clientes.

Para modelagem dos pedidos a serem enviados, destinos, tipos de veículos utilizados, política de envio, dias e horários de funcionamento da transportadora, utilizou-se a tabela *Shipping*. Inicialmente, foram criadas demandas de entrega aleatórias para cada cliente, com a utilização de todos os veículos para realização das entregas, considerando o horário comercial brasileiro (das 09:00 às 17:00) e com política de envio *first in, first out* (FIFO). As políticas de envio da tabela *Shipping* são consideradas apenas se a quantidade necessária de produtos estiver em estoque no CD da transportadora. Caso não haja estoque suficiente, o pedido é mantido na carteira de pedidos do CD até que possa ser entregue. Como neste trabalho não há a intenção de se analisar os estoques das transportadoras, utilizou-se uma política de inventário ilimitado (tabela *inventory*), para fins de simplificação do modelo. Por fim, para definir a transportadora como fonte de recurso de todos os clientes, foi utilizada a tabela “*Sourcing*”.

A Tabela 3 apresenta os dados de entrada do modelo.

Tabela 3- Dados de entrada da simulação

Agente	Parâmetro	
Cientes	Demanda	
	Localização	
Transportadora	Localização	
	Histórico de entregas	
	Capacidade de estoque	
	Velocidade média	
	Número de veículos	Emissão de Poluentes
		Custo com combustível
	Pedidos	Peso dos pacotes
		Volume

Os valores dos parâmetros podem ser definidos como determinísticos ou estocásticos, dependendo da situação a ser simulada e utilizam informações da oferta para modelagem da demanda de entregas. Os resultados a serem analisados como saídas do modelo incluem:

- Distância percorrida (DP): calcula as estatísticas sobre a quilometragem total percorrida por todos os veículos ao final de cada dia, utilizando para isso, a conversão das coordenadas projetadas para distância. Os dados são atualizados quando os veículos retornam às instalações, considerando o somatório das distancias percorridas (D), conforme Equação 1:

$$DP = \sum_{k=0}^n Dk \quad (1)$$

- Volume transportado (Pedidos) (VT): calcula as estatísticas sobre a quantidade diária de pedidos enviados aos clientes em termos de volume. Os dados são atualizados ao final de cada dia, mostrando os dados das remessas enviadas, considerando o somatório dos volumes transportados (V), conforme Equação 2:

$$VT = \sum_{k=0}^n Vk \quad (2)$$

- Gasto com combustível (GC): calcula as estatísticas sobre os custos de combustível do centro de distribuição da transportadora para instalações, entre instalações e de instalações para clientes. Os dados são atualizados ao final de cada dia, mostrando a soma de todos os custos do dia, considerando o somatório da quilometragem percorrida (Q) multiplicado pelo custo de combustível por quilometro (C) de cada veiculo, conforme Equação 3:

$$GC = \sum_{k=0}^n Qk \cdot C \quad (3)$$

- Número de viagens (NV): calcula as estatísticas sobre o número de saídas dos veículos de um centro de distribuição durante todo o dia. Os dados são atualizados cada vez que um veículo sai para entregar mercadorias partindo do centro de distribuição, considerando o somatório do número de viagens realizadas (V), conforme Equação 4:

$$NV = \sum_{k=0}^n Vk \quad (4)$$

- Emissões de CO₂ (ECO₂): calcula as estatísticas sobre a quantidade de emissões de CO₂ produzidas pelos veículos que entregam produtos partindo do centro de distribuição da transportadora para instalações, entre instalações e de instalações para clientes. Os dados são atualizados ao final de cada dia, considerando a emissão de cada veículo por quilometro (E) multiplicado pela quilometragem percorrida (Q), conforme Equação 5:

$$ECO_2 = E \cdot Qk \quad (5)$$

- Taxa de ocupação média dos veículos (TO): calcula a média de ocupação todos os veículos utilizados para realização das entregas, considerando a relação entre o volume transportado (VT) e a capacidade total da frota (CT), conforme Equação 6:

$$TO = \sum_{k=0}^n \frac{VTk}{CT} \cdot 100 \quad (6)$$

É importante ressaltar que o modelo desenvolvido se limitou a reproduzir as operações de uma transportadora do *e-commerce* para atender a demanda de entregas de seus clientes, visando analisar comparativamente os impactos trazidos sobre as operações de entrega na última milha durante eventos disruptivos. O modelo não leva em consideração os aspectos comportamentais dos clientes. Maiores informações sobre todas as ferramentas, estatísticas e tabelas de modelagem do *software* podem ser obtidas em Ivanov (2021).

3.4.5 Verificação e Validação do Modelo de Simulação

De acordo com Sargent (2013), a etapa de verificação e validação consiste em assegurar a implementação do modelo computacional a partir do modelo conceitual. O processo de verificação foi efetuado em duas etapas, como utilizado por Alves (2019). Primeiramente, comparou-se a lógica e os elementos do modelo computacional com a lógica e os elementos do modelo conceitual validado. Após essa comparação, a segunda etapa foi executada utilizando o *debugger build model* do ALX. Durante o processo de verificação foram identificadas e realizadas as devidas correções. A maior parte desses erros estava relacionada com a modelagem das operações que continham os dados de entrada do modelo e com a lógica de funcionamento do sistema modelado. A verificação foi concluída quando não foram mais identificados erros estruturais e lógicos no modelo computacional construído.

Com o modelo computacional verificado, iniciou-se a fase de validação. O modelo desenvolvido foi utilizado para simular as ações e interações dos agentes e suas operações com o objetivo de avaliar seus efeitos no sistema como um todo. Assim como na validação do modelo conceitual, a técnica de validação *face to face* foi utilizada para validar se os resultados encontrados computacionalmente se comportam conforme a realidade, pois conforme destacado por Sargent (2013) e mencionado anteriormente, esta técnica de validação é amplamente utilizada em estudos de simulação.

De acordo com Chwif e Medina (2015), neste processo o modelo desenvolvido é discutido com especialistas que realmente entendem do processo simulado. A animação da simulação e os resultados obtidos foram apresentados a especialistas da área de logística urbana. Esses especialistas são pesquisadores do TUC do *e-commerce* e gestores responsáveis pelas operações de entrega de uma transportadora de São João Del Rei-MG. A partir da observação, principalmente da animação, eles puderam confirmar que as ações, interações e resultados do modelo estão condizentes com a realidade de uma transportadora.

Após a validação do modelo, foi realizada a análise do número de replicações que serão utilizadas em cada experimento. Para isso, foram analisadas as combinações de 3, 5, 10 e 15 e replicações, simulando um mês de entregas. A Tabela 4 apresenta a média das replicações, desvio padrão e coeficiente de variação.

Tabela 4- Análise do Número de Replicações

Nº de replicações	σ	\bar{u}	<i>CV</i>									
	3			5			10			15		
Distância percorrida (Km)	75,91	4835,26	1,57	88,18	4872,31	1,81	96,29	4915,11	1,96	84,31	4926,82	1,71
Volume transportado (m ³)	0,00	1226,6	0,00									
Gasto com combustível	0,51	1497,74	0,03	0,85	1498,05	0,06	0,93	1498,69	0,06	1,54	1498,61	0,10
Número de viagens	0,82	227,00	0,36	1,33	226,20	0,59	3,21	227,90	1,41	3,33	228,80	1,46
Emissões de CO ₂ (Kg)	1,46	1096,24	0,13	2,26	1097,59	0,21	2,38	1098,13	0,22	3,15	1097,34	0,29
Taxa de ocupação média dos veículos	0,01	0,68	1,01	0,01	0,68	1,05	0,01	0,68	1,30	0,01	0,68	1,33

σ : desvio padrão

\bar{u} : média aritmética

CV: Coeficiente de variação

Conforme observado na Tabela 4, as variações entre as replicações são pequenas, principalmente, nos cenários com 3 replicações. Para a distância percorrida pelo caminhão, o coeficiente de variação com 3 replicações é 1,57%, enquanto com 15 replicações passa a ser 1,71%, uma diferença de 0,14%. Não foram observadas grandes variações entre 3, 5, 10 e 15 replicações. Além da análise estatística das replicações, um fator determinante para escolha do número de replicações foi o tempo de execução do modelo, que em alguns casos, como em cenário com alta demanda de entregas, chegou a 36 horas em uma única replicação, ficando inviável computacionalmente executar um número muito alto de replicações. Com base nos motivos apresentados, recomenda-se utilizar cenários com 3 réplicas para a aplicação da ferramenta. A depender da situação a ser estudada, um teste t para normalidade também pode ser utilizado para definição do número de replicações.

3.4.6 Análise de indicadores e custos

Com o objetivo de obter resultados comparáveis para cada cenário com a aplicação do DISRUPSIM, serão analisados indicadores relativizados em termos custos para cada cenário simulado. São eles (MOLAEINASAB; DAHIMI; SAMIMI 2022):

- Custo por metro cúbico transportado;
- Custo por quilograma de CO₂;
- Custo por quilômetro rodado;
- Custo por pedido entregue.

O custo por metro cúbico transportado (CVT) representa a relação entre o custo com combustível (C_c) e o volume de mercadorias transportado (V), tendo como unidade de apresentação a expressão R\$/m³. Sua aplicabilidade está na verificação do gasto de combustível a cada metro cúbico transportado, conforme equação 7.

$$CVT = \sum_{k=0}^n \frac{C_c}{V_k} \quad (7)$$

O custo por quilograma de CO₂ emitido (CE) representa a relação entre o gasto combustível (C_c) e o total de CO₂ emitido (E) pela transportadora, tendo como unidade de apresentação a expressão R\$/CO₂. Sua aplicabilidade está na verificação do gasto de cada quilograma de CO₂ emitido, conforme equação 8.

$$CE = \sum_{k=0}^n \frac{Cc}{Ek} \quad (8)$$

O custo por quilômetro rodado (CQ) representa a relação entre o gasto total de combustível (Cc) e a quilometragem percorrida para realização das entregas (Q), tendo como unidade de apresentação a expressão R\$/km. Sua aplicabilidade está na verificação do gasto de combustível a cada quilômetro rodado, conforme equação 9.

$$CQ = \sum_{k=0}^n \frac{Cc}{Qk} \quad (9)$$

O custo por pedido entregue (CP) representa a relação entre o gasto total de combustível (Cc) e o total de pedidos entregues pela empresa (P). Sua aplicabilidade diz respeito ao custo para se entregar cada pedido, conforme equação 10.

$$CP = \sum_{k=0}^n \frac{Cc}{Pk} \quad (10)$$

Ainda, para justificar a importância das questões de sustentabilidade, os cálculos de eficiência energética (CEE) das operações serão realizados. Para isso, será utilizada a seguinte equação (MILEWSKI *et al.* 2022) (Equação 11):

$$CEE = \frac{Cpv * D}{C * U} \quad (11)$$

Onde:

- EE: Consumo unitário de combustível [l/km/entrega]
- Cpv: Consumo de combustível por um determinado veículo [l/km/veículo]
- D: Distância [km]
- C: Capacidade [entregas]
- U: Utilização da Capacidade [%]

3.5 Resumo das etapas para aplicação da ferramenta

Nesta seção descrevemos o passo a passo para aplicação do DISRUPSIM. Além de permitir uma melhor compreensão da sequência de procedimentos a ser realizada, a descrição resumida das várias etapas pode auxiliar no desenvolvimento de trabalhos futuros visando a consolidação da ferramenta.

1. Estabelecimento das bases do modelo
 - a) Base de dados – formalização da parceria com uma transportadora para obtenção de:
 - Definição da dimensão temporal (definição do período a ser estudado);
 - Localização do centro de distribuição da transportadora (informações geográficas);
 - Histórico de entregas realizadas (demanda dos clientes);
 - Dados sobre a frota da transportadora (número de veículos, capacidade de carga, velocidade, emissões de CO₂*, gasto médio com combustível de cada veículo);
 - Dados sobre os pedidos entregues (peso e volume);
 - Dados sobre as regiões atendidas (bairros, distritos e cidades atendidos);
 - Dados sobre o planejamento das entregas (programação e política de atendimento).
 - b) Elaboração de lógica de concepção dos cenários a serem simulados
2. Modelagem
 - a) Base operacional – estruturação dos dados para modelagem e calibração do modelo com os dados obtidos em (1).
 - Lista de tabelas utilizadas no *software* para entrada dos dados (Tabela 5):

Tabela 5- Lista de tabelas utilizadas para modelagem no software

Nome da Tabela	Objetivo
<i>Costumers</i>	Nomear os clientes, localização e tipologia
<i>DC and Factories</i>	Nomear o centro de distribuição da transportadora e outras instalações
<i>Demand</i>	Informar os dados de demanda e o tipo de produto para cada cliente
<i>Fleets</i>	Informar a quantidade de veículos da transportadora
<i>Groups</i>	Definir os grupos de clientes atendidos pela transportadora e outras instalações
<i>Inventory</i>	Definir a capacidade de estoque da transportadora
<i>Locations</i>	Informar a localização geográfica dos clientes, transportadora e outras instalações
<i>Milk Run</i>	Modelagem da programação de entregas da transportadora para cada veículo
<i>Paths</i>	Modelagem dos caminhos de ida e volta de cada veículo para cada grupo de clientes e outras instalações, custos com combustível e emissão de CO ₂
<i>Periods</i>	Definir o período de simulação
<i>Products</i>	Definir os tipos de produtos entregues
<i>Shipping</i>	Modelar a política de entrega e horário de funcionamento da transportadora
<i>Soucing</i>	Modelar a fonte de recurso e os tipos de produtos para abastecimento de todas as instalações e clientes do modelo
<i>Units Conversions</i>	Definir o volume de cada produto transportado com base em seu peso
<i>Vehicle Types</i>	Informar os tipos de veículos da transportadora, capacidade de carga e velocidade

* Caso a transportadora não possua informações sobre as emissões de CO₂ dos veículos, esses dados poderão ser consultados em: <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/relatorios-e-publicacoes/>.

3. Definição das medidas de desempenho utilizadas no modelo:
 - Distância percorrida (km);
 - Volume transportado (m³);
 - Gasto com combustível (R\$);
 - Número de viagens;
 - Emissões de CO₂ (kg);
 - Taxa de ocupação média dos veículos.
4. Simulação de cenários:
 - Simulação de cenários iniciais
 - Análise dos resultados
 - Definição de iniciativas de *City logistics* para novos cenários a serem simulados
 - Análise de sensibilidade (DoE) para novos parâmetros a serem simulados, se for o caso
 - Realização de experimentos (geração de cenários comparativos com iniciativas de *City logistics* escolhidas)
5. Análise de indicadores de desempenho para os cenários simulados, com base nos resultados obtidos em na etapa 4:
 - Custo por metro cúbico transportado
 - Custo por quilograma de CO₂
 - Custo por quilômetro rodado
 - Custo por pedido entregue
6. Realização do cálculo da eficiência energética para os cenários simulados, com base nos resultados obtidos na etapa 4.

Por meio da funcionalidade GIS o modelo pode ser adaptado para diferentes localidades, alterando a localização dos agentes e os parâmetros de entrada para a realidade local. Os parâmetros de saída do modelo também podem ser alterados, de acordo com as necessidades das transportadoras. A Figura 10 ilustra as atividades a serem desenvolvidas.

Na aplicação realizada neste trabalho, a adoção de DLs foi escolhida como a iniciativa de *City logistics* para simulação de cenários comparativos. Exemplos de adaptação da modelagem para outras iniciativas podem ser encontrados no Apêndice B e C. A depender da iniciativa de *City logistics* escolhida, pode-se utilizar o ambiente GFA do ALX para localização de instalações e da análise de sensibilidade para auxiliar na determinação da relevância dos parâmetros a serem simulados.

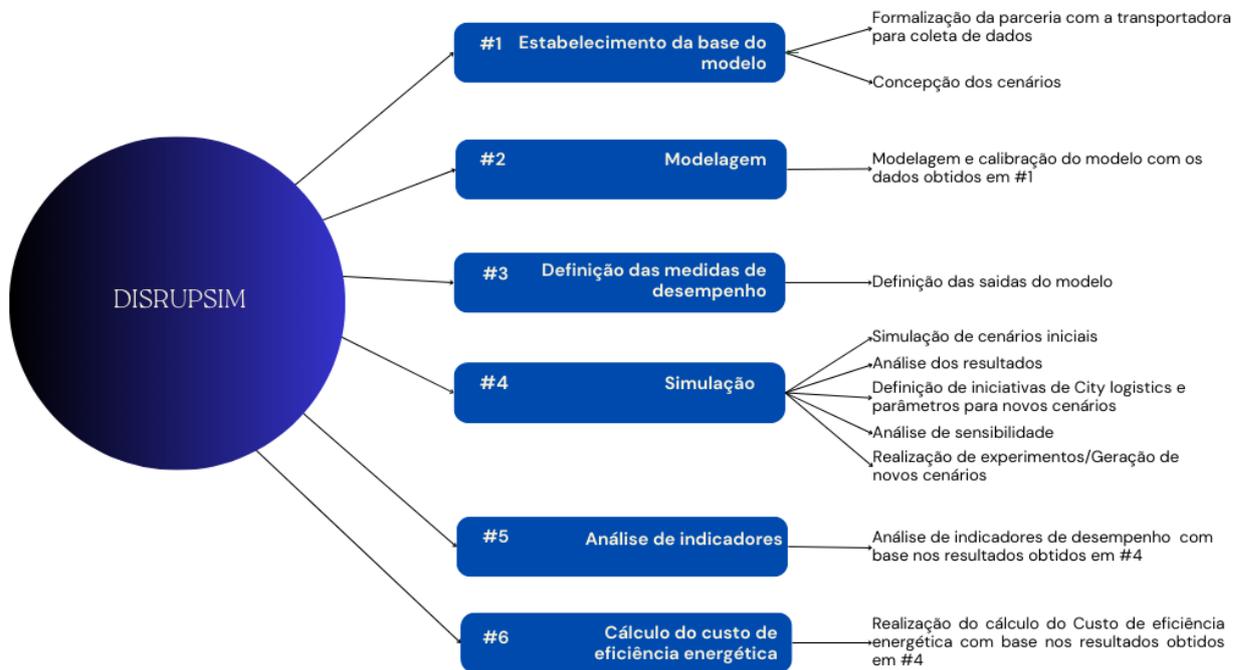


Figura 10- Passo a passo para aplicação do DISRUPSIM.

4 APLICAÇÃO

A ferramenta proposta neste trabalho foi aplicada para um caso específico de uma transportadora da cidade de São João Del Rei- MG, participante da validação da ferramenta e que concordou em ceder os dados para aplicação da ferramenta. Dessa forma, pôde-se testar e validar o DISRUPSIM para verificar com sua utilização pode auxiliar no planejamento e tomada de decisão em tempo real durante o acontecimento de um evento disruptivo. A transportadora faz parte de uma rede de filiais que estão localizadas em mais de 5.000 (cinco mil) municípios do Brasil, as quais têm perfis semelhantes por trabalharem exclusivamente com a realização de entregas do *e-commerce* e estão presentes em cidades de pequeno, médio e grande porte. Sendo assim, a ferramenta pode ser aplicada em qualquer um desses municípios, desde que os parâmetros de entrada do modelo sejam adaptados. A Figura 11 apresenta o ambiente de simulação após a entrada dos dados.

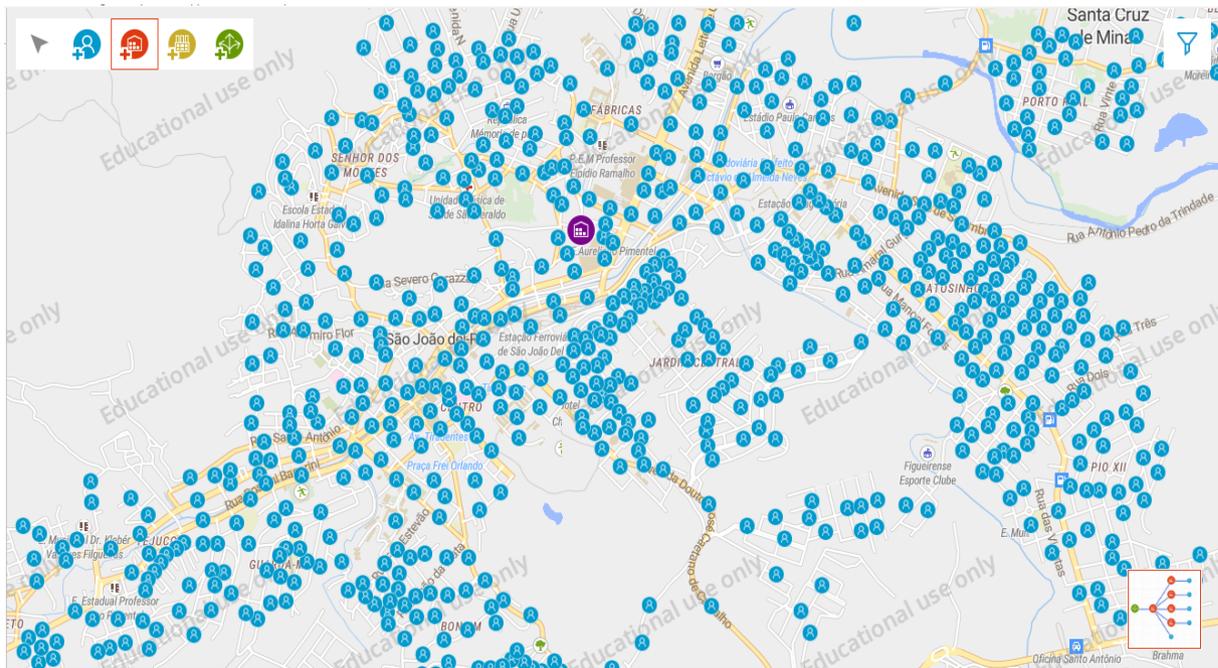


Figura 11 - Ambiente de simulação após entrada dos dados

As localizações dos clientes e da transportadora foram adaptadas no modelo por meio da ferramenta GIS, conforme descrito no capítulo 3.4.4. Por questões de limitação da transportadora e confidencialidade dos clientes, não foram obtidas as localizações reais de cada cliente. Desse modo, para atualizar as localizações dos clientes no modelo, foram adicionadas localizações aleatoriamente em cada um dos seis principais bairros de São João Del Rei e em três cidades vizinhas (Rio das Mortes, Tiradentes e Santa Cruz de Minas), considerando o número de entregas por dia em cada bairro, distrito e de reentregas, fornecidos pela transportadora.

O número de clientes em cada bairro e distrito foi modelado de acordo com o número máximo de entregas realizadas em um dia durante o mês, para simplificação e capacidade de simulação do modelo. Por exemplo, se em determinado bairro o número máximo de entregas realizadas durante os dias do mês foi de 50 entregas, foram localizados 50 clientes nesse bairro. As demandas desses clientes foram obtidas por meio do histórico de entregas da transportadora (contendo datas, números de pedidos enviados para entrega em cada dia do mês, destino das entregas e número de entregas não realizadas), considerando o período de um mês. A tabela *Units* foi usada para criar a representação de peso e volume que serão utilizados durante a simulação. Esta representação refere-se a tipos de produtos específicos, podendo haver apenas uma equivalência de peso e volume para cada produto registrado na tabela. Os produtos criados foram denominados como produto 1, produto 2 e produto 3 e seus volumes equivalentes foram 0,1, 0,6 e 1 m³, respectivamente. O período escolhido para simulação foi o da pandemia da COVID-19, visto que se trata de um evento disruptivo recente e de longa duração.

Foram simulados cenários considerando períodos antes e durante a pandemia, referentes ao mês de junho de 2019, 2020 e 2021, por se tratar do mês em que a transportadora atingiu seu pico de entregas em 2020 durante a pandemia para fins de comparação com os outros cenários. O histórico de entregas da transportadora serviu como dado de entrada para o modelo por meio da tabela “*Demand*”. Os fatores de emissões e autonomia dos veículos foram obtidos por meio do relatório da CETESB (2021). Como fator emissão utilizou-se a emissão de CO₂ média dos últimos 5 anos para cada um dos veículos do modelo. Para o cálculo do consumo médio de combustível por quilometro de cada veículo, utilizou-se a autonomia e o valor de R\$4,50 por litro, referente à época da realização deste estudo.

A transportadora contou com 3 veículos para realização das entregas durante o período estudado, sendo um caminhão e duas *pickups* modelo Fiorino. As capacidades de carga dos veículos foram definidas como 10 m³ para o caminhão 7 m³ para as *pickups* e a velocidade média durante a realização das entregas de 10 a 20 km/hora. Durante a pandemia a transportadora informou que foi adicionada uma motocicleta à sua frota. Todos esses dados foram utilizados como dados de entrada para criação da frota durante a modelagem dos cenários. Para isso, as tabelas *Fleets* e *Vehicles* foram atualizadas.

A ferramenta *Milk Run* do ALX foi utilizada para programar manualmente as entregas em cada cenário simulado, reproduzindo as rotas realizadas por cada veículo da transportadora, em cada localidade, também de acordo com o histórico de entregas. É importante ressaltar que não houve otimização das rotas do modelo, pois os cenários tiveram como objetivo reproduzir as

entregas realizadas pela transportadora, retratando a realidade. Portanto, não foram utilizados nenhum tipo de algoritmo ou técnica de otimização nesta etapa.

No modelo, uma vez realizada a entrega do último cliente, o caminhão retorna para o CD da transportadora para formação de uma nova carga, até que o dia de trabalho termine. O volume de ocupação dos pedidos nos veículos foi mantido e seguem os valores definidos na construção do modelo de simulação. Os caminhos entre a transportadora e os clientes foram adaptados por meio da tabela “*Paths*”, de modo que a transportadora atendesse a todos os clientes do modelo. A transportadora permaneceu como a fonte de recurso dos clientes e a política de entrega permaneceu como FIFO, conforme informações obtidas junto à transportadora. O horário das entregas também foi definido conforme o horário de funcionamento da transportadora, das 09:00 às 17:00.

Após a entrada de dados do modelo, foram simulados 4 cenários iniciais, denominados cenários bases (A, B, C e D), para fins de comparação e análise. No cenário A, foram simuladas as entregas realizadas pela transportadora em junho de 2019, totalizando 2160 entregas. Esse cenário representa as operações de entrega da transportadora, antes da ocorrência da pandemia. Nos cenários B e C, foram simuladas as entregas realizadas em junho de 2020 e junho de 2021, totalizando 4733 e 2655 entregas, respectivamente. Esses cenários representam as operações de entrega da transportadora durante a pandemia. No cenário D, foi simulado um cenário alternativo para o ano de 2020, utilizando uma projeção de crescimento de 20% prevista para o setor de *e-commerce*, conforme relatório publicado pela Statista (2020), caso não houvesse pandemia, para fins de comparação com os demais cenários. A Figura 12 apresenta os cenários base simulados.

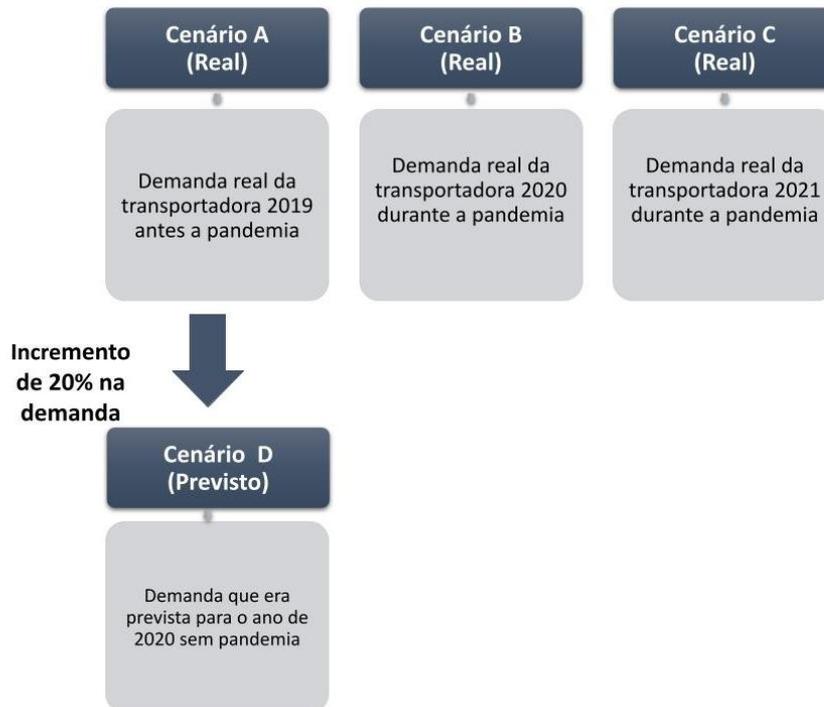


Figura 12- Cenários Base

4.1 Análise de Sensibilidade

Para exemplificar a elaboração dos cenários comparativos e identificar os fatores críticos da implementação de uma iniciativa de *City logistics*, os DLs, na aplicação do DISRUPSIM realizada neste trabalho, utilizou-se a metodologia chamada Projeto de Experimentos (*Design of Experiment – DoE*) para a situação estudada, conforme descrito por Montevechi, Miranda e Friend (2012). O DoE possibilitou a análise de sensibilidade do modelo simulado, identificando o impacto de variáveis específicas e investigando suas interações. Cabe ressaltar que a depender da iniciativa estudada, não será necessária.

Em um estudo de simulação uma análise de sensibilidade pode ser realizada com o objetivo de selecionar as variáveis mais significativas entre aquelas que podem até mesmo ser eliminadas das análises mais detalhadas (MONTEVECHI, MIRANDA e FRIEND, 2012). No DoE, as variáveis do modelo de simulação são chamadas de fatores, e cada fator pode ter diferentes valores, chamados de níveis, que representam variações consideradas para cada fator. A variável de resposta é uma medida de desempenho ou saída do modelo de simulação.

Neste estudo, utiliza-se o Planejamento Fatorial Completo, que permite uma varredura completa da região de estudo ao considerar todos os fatores e seus níveis (com 95% de confiança). Foram utilizados o ambiente GFA e SIM do ALX e o *software* estatístico Minitab® para a

localização dos DLs, o desenvolvimento da matriz experimental do DoE e para as análises estatísticas, realizadas neste trabalho. Para mais informações sobre o DoE, pode-se consultar Montgomery (2005), e Banks *et al.* (2010). Os parâmetros de entrada que compuseram as simulações, o DoE e os níveis de cada um estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros utilizados para a composição do DOE

	Nível -	Nível Intermediário	Nível +
%DL	0.10	0.25	0.45
D(km)	2	-	3

Como observado na Tabela 6, o parâmetro %DL, que se refere à taxa de uso dos DLs pelos clientes, é o único parâmetro que possui 3 níveis no DoE. Seguiu-se o valor próximo ao encontrado no estudo de Oliveira *et al.* (2017) e Alves *et al.* (2019) para o “nível +”, que indica uma propensão ao uso dos DL pelos clientes do *e-commerce* no Brasil de 45%. Escolheu-se esse valor como maior valor para elaboração dos cenários comparativos, pois conforme observado na literatura, nos países nos quais os DLs estão em uso, a taxa de utilização não ultrapassou este valor (CARDENAS *et al.*, 2017). Os demais níveis foram então menores que este valor, sendo que o “nível -” buscou representar uma situação em que 10% das entregas ocorrem nos DLs. Considerou-se para esse nível uma pesquisa realizada por Oliveira (2021), no qual a autora afirma que antes da pandemia, 10% dos clientes do *e-commerce* já haviam utilizado o sistema de entregas por DLs. Para o nível intermediário, utilizou-se dados do portal *e-commerce* Brasil (2021), que apresentou uma projeção de crescimento de 15% na utilização dos DLs, para os anos de 2020 e 2021.

Para a implantação dos DLs, optou-se por simular cenários com a distância máxima entre o cliente e os DLs de 2 e 3 quilômetros (km). Com relação a essas distâncias, buscou-se valores na literatura, tanto para o “nível +” quanto para o “nível -”, visando a adoção por parte dos clientes. De acordo com pesquisas no Brasil, 95% dos consumidores concordam em retirar suas entregas num raio de 2000 metros (30 min ou menos) (FARIA, 2021; ALVES *et al.*, 2022). Entretanto, conforme demonstrado no estudo de Faria (2021), esses clientes estão dispostos a aceitar a flexibilização desta distância até 3000 metros para retirar seus produtos, desde que os DLs estejam localizados em regiões seguras para a circulação, ou seja, de baixa criminalidade ou consideradas como “não perigosas”. Esses valores foram então utilizados como fator de distância máxima entre os DLs e os clientes, visando analisar o benefício de sua implementação nas operações da transportadora.

Foi utilizado o ambiente de GFA¹ para localização dos DLs. Os parâmetros considerados durante a análise foram as distâncias dos clientes até os DLs e as demandas dos clientes por entregas, já modelados no ambiente SIM e importados para o ambiente GFA do ALX. A identificação das localizações para novas instalações foi determinada pela soma das distâncias (D) entre os clientes e a transportadora e os centros de gravidade mais próximos, ponderados pela demanda de entregas dos clientes (d). Os resultados da análise são locais aproximados e ideais para novas instalações (IVANOV, 2020). Esses pontos ideais são chamados de “centros de gravidade”. Conforme explicado anteriormente, esses chamados “modelos de gravidade” determinam o local em que o custo de todo o transporte de entrada e saída é minimizado, considerando para isso, a demanda do sistema (IVANOV *et al.*, 2021). Isso leva à formulação da função objetivo utilizada pelo *software*, conforme demonstrado em seu manual e reproduzido nas Equações 12, 13 e 14:

$$\text{Min } Z(p_x; p_y) = \sum_{i=1}^N d((p_x, p_y); (x_i; y_i)) \cdot D(x_i; y_i) \quad (12)$$

$$p_x = \frac{\sum_{j=1}^N \frac{D(x_j; y_j) \cdot x_j}{\sqrt{(p_x - x_j)^2 + (p_y - y_j)^2}}}{\sum_{j=1}^N \frac{D(x_j; y_j)}{\sqrt{(p_x - x_j)^2 + (p_y - y_j)^2}}} \quad (13)$$

$$p_y = \frac{\sum_{j=1}^N \frac{D(x_j; y_j) \cdot y_j}{\sqrt{(p_x - x_j)^2 + (p_y - y_j)^2}}}{\sum_{j=1}^N \frac{D(x_j; y_j)}{\sqrt{(p_x - x_j)^2 + (p_y - y_j)^2}}} \quad (14)$$

A Equação 12 determina o local onde o custo de todo o transporte de entrada e saída é minimizado. Esse custo é diretamente proporcional à distância e ao volume de transporte (ou seja, demanda). As equações 13 e 14 determinam os pares de coordenadas para localização de novas instalações, de forma que os custos de transporte sejam minimizados. Para encontrar as localizações ótimas para as novas instalações o ALX utiliza o solucionador CPLEX. As Figuras 13 e 14 demonstram, respectivamente, o resultado da GFA para localização dos DLs considerando a distância máxima de 2 e 3 quilômetros entre os clientes e cada instalação.

¹ O método utilizado no ambiente GFA é baseado no método do centro de gravidade, que é um método de projeto de rede comumente usados para resolver problemas de localização (*facility*).

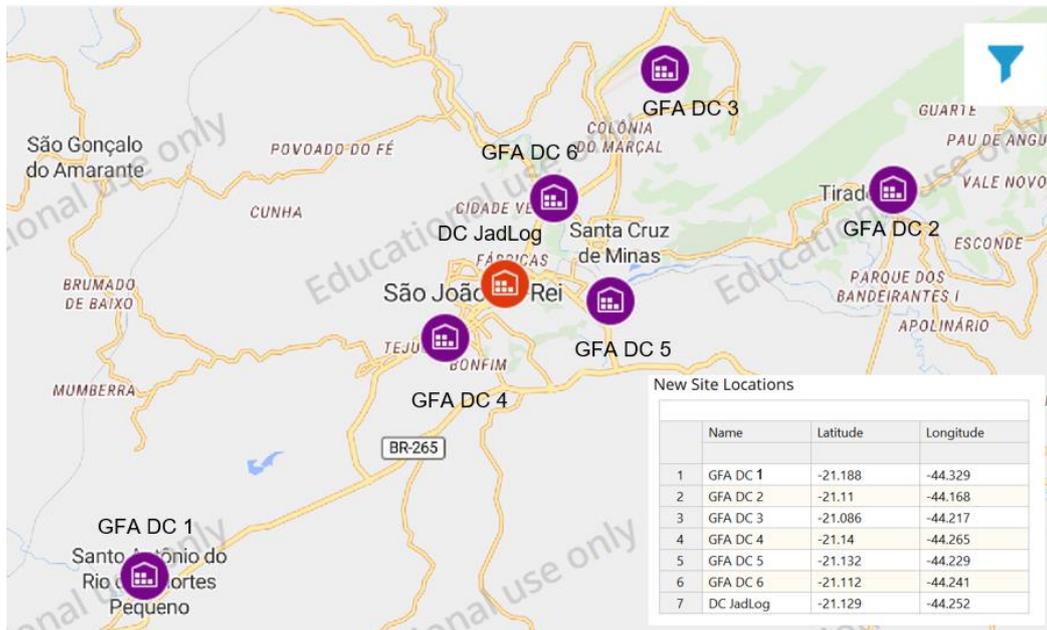


Figura 13- Localização dos DLs (até 2 km)

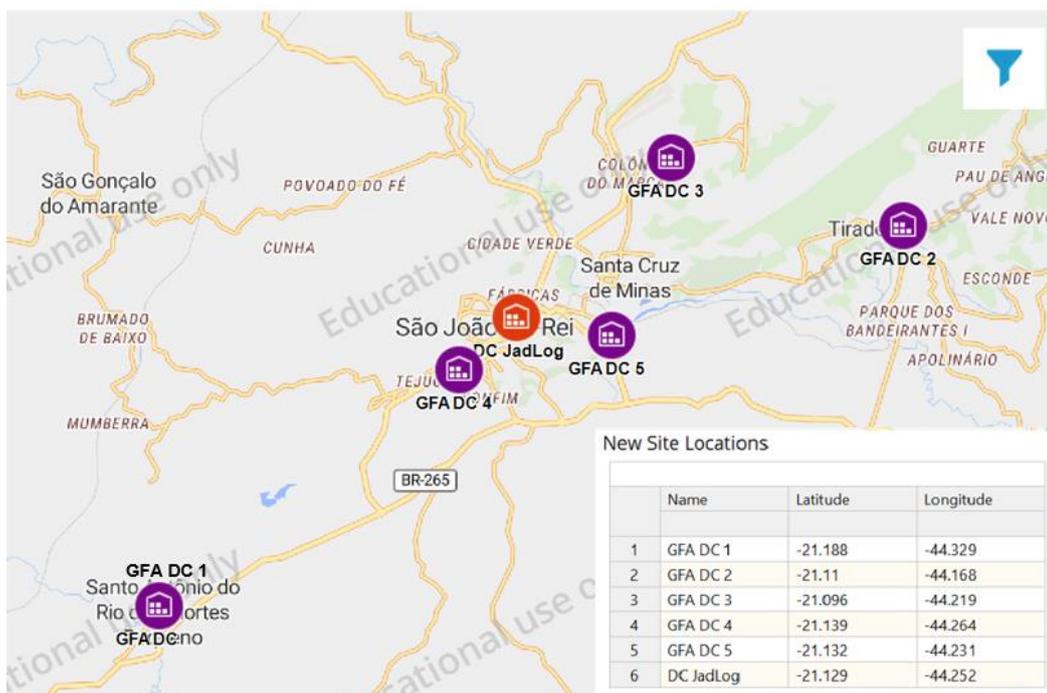


Figura 14- Localização dos DLs (até 3 km)

Observa-se que foram sugeridos a implantação de 6 DLs considerando a distância máxima de 2 km e 5 DLs considerando a distância máxima de 3 km. Conforme resultados da simulação, por meio dos locais sugeridos para instalação dos DLs, é possível manter uma distância média variando entre 856 e 876 metros entre esses locais e os clientes, respectivamente. Isso pode incentivar o uso dessa iniciativa por parte dos clientes e trazer benefícios para a operação de entrega da transportadora, visto que pesquisas no Brasil revelam que os clientes estão dispostos a

caminhar até 1000 metros para retirar sua mercadoria em um DL (FARIA, 2021; OLIVEIRA *et al.*, 2017). Esses ganhos serão demonstrados nas próximas seções deste trabalho.

Definidos a quantidade e os locais dos DLs, os resultados das análises GFA foram novamente importados para o ambiente de SIM e iniciou-se o desenvolvimento da matriz experimental do DoE (Figura 15) para simulação dos cenários, considerando os respectivos fatores e níveis demonstrados na Tabela 7.

Tabela 7- Matriz Experimental

Ordem Padrão	%DL	Km	D (Km)	V (m³)	R\$	NV	CO₂ (Kg)	TO
1	10	2	4719,41	1221,00	1386,11	212,00	1023,33	0,72
2	10	3	4706,94	1204,00	1375,73	210,00	1016,73	0,72
3	25	2	4196,31	1180,90	1165,19	191,00	861,87	0,76
4	25	3	4113,94	1135,00	1152,38	189,00	854,69	0,77
5	45	2	3735,82	1105,20	885,73	179,00	650,28	0,79
6	45	3	3615,30	1070,20	878,97	176,00	647,55	0,79
7	10	2	4778,42	1207,30	1382,13	208,00	1020,92	0,73
8	10	3	4735,94	1204,00	1376,43	212	1016,21	0,71
9	25	2	4178,04	1180,90	1164,85	192,00	860,93	0,76
10	25	3	4206,26	1135,00	1153,41	189,00	856,31	0,76
11	45	2	3705,02	1105,20	886,07	179,00	651,22	0,79
12	45	3	3607,26	1070,20	878,11	176,00	646,4	0,79
13	10	2	4737,42	1207,30	1382,99	210,00	1022,07	0,72
14	10	3	4774,69	1204	1376,77	212,00	1017,15	0,71
15	25	2	4218,57	1180,90	1164,50	191,00	861,19	0,76
16	25	3	4218,14	1135,00	1153,07	190,00	855,37	0,76
17	45	2	3725,95	1105,20	885,73	179,00	650,28	0,79
18	45	3	3558,82	1070,20	878,99	179,00	645,15	0,78

Para a experimentação, foram simulados cenários com dados da transportadora para o cenário de 2019, visando realizar uma análise dos fatores e a replicação deles nos próximos cenários. Da combinação de todos os parâmetros e níveis entre si, replicando-se cada cenário 3 vezes, resultaram 18 cenários simulados. Após simulados os experimentos, foi realizada a análise de variância (ANOVA) para estimação dos efeitos dos fatores estudados nas variáveis de resposta. Neste estudo, as variáveis de resposta de interesse são aquelas utilizadas nos primeiros cenários: distância total percorrida pelos veículos, volume transportado, gasto com combustível, número de viagens realizadas, emissões de CO₂ e a taxa de ocupação dos veículos. Calculou-se o *p-valor* em relação a estas variáveis.

Tabela 8 - Análise de Variância (ANOVA) das variáveis de saída

Cenário 1 (2019)	Quilometragem percorrida (Km)	Volume médio transportado (m ³)	Gasto com combustível (R\$)	Número de viagens	Emissões de CO ₂ (Kg)	Taxa de ocupação média dos veículos
%DL	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
D(KM)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
%DL* D(KM)	0,01	0,00	0,00	0,05	0,26	0,08
R ² =	99,61	99,74	100	99,45	100	98,27
R ² (adj)=	99,45	99,64	100	99,23	100	97,55
R ² (pred)=	99,13	99,43	100	98,77	100	96,11

Com base na análise estatística, observa-se que os valores de R² são bem próximos a 100% e indicam que o ajuste do modelo foi satisfatório. A adequação do modelo estatístico foi verificada por meio do teste de normalidade de Anderson-Darling para os resíduos. Os resíduos de todas as variáveis de resposta analisadas apresentaram comportamento adequado às condições de normalidade do experimento. Pelo teste de Anderson-Darling não se pode rejeitar a hipótese de que os resíduos seguem uma distribuição normal, pois alguns *p-valores* encontrados são maiores que 0,05.

De acordo com os resultados encontrados na Tabela 8, é possível observar que todos os cinco fatores interferem significativamente nas variáveis de resposta. Nota-se que o parâmetro %DL possui importância significativa sobre as variáveis de resposta. As distâncias utilizadas para instalações dos DLs também possuem significância em todos os resultados. A análise da interação de segunda ordem entre os parâmetros %DL* D(KM), demonstrou que esses fatores também interferem nas variáveis de resposta, com exceção da emissão de CO₂ e da taxa de ocupação dos veículos, no qual as interações entre eles não demonstraram alta significância.

No Apêndice A pode-se observar graficamente a interação dos parâmetros para cada fator em cada variável de resposta. Pelos gráficos de interação e efeitos principais, pode-se observar que a localização dos DLs considerando a distância máxima de 2 Km apresentou melhores resultados e uma inclinação maior da reta, quando comparado com a distância de 3 Km, bem como uma melhor taxa de ocupação dos veículos, respectivamente. Deste modo, optou-se pela implantação dos DLs considerando a distância de 2 km para a simulação dos próximos.

4.2 Elaboração dos cenários comparativos

Após a construção dos cenários base, foram elaborados cenários comparativos considerando a implantação de uma iniciativa de *City logistics*, os DLs. Cada cenário comparativo,

simulou 3 situações para cada cenário base. Nesses cenários, os clientes fazem uso dos DLs para retirar suas encomendas, aumentando sua adesão em cada cenário simulado, com o objetivo de avaliar os benefícios da implantação dessa iniciativa.

Para construção desses cenários importou-se cada cenário base para o ambiente GFA do ALX. Para cada cenário base foram localizados os DLs, considerando uma distância máxima de 2 km entre os DLs e os clientes, conforme a análise de sensibilidade realizada na seção 4.2.1. Para cada cenário base foram localizados 5 DLs, com uma distância média de 876 metros entre essas instalações e os clientes. Definidos a quantidade e os locais dos DLs, os resultados das análises GFA de cada cenário base foram novamente importados para o ambiente de SIM. A partir dessa etapa, foram criadas rotas entre a transportadora e os DLs e entre os DLs e os clientes por meio da tabela “*Paths*” de cada cenário. Como neste estudo buscou-se analisar as emissões e os gastos com combustível da transportadora, o custo de combustível e as emissões da ida dos clientes até os DLs para retirar suas mercadorias foram desconsiderados.

A ferramenta *Milk Run* foi utilizada para programar manualmente as entregas em cada um dos DLs para cada cenário simulado, aumentando o número de entregas nessas instalações a cada cenário. Nos cenários A1, B1, C1 e D1, 10% das entregas foram destinadas para os DLs. Nos cenários A2, B2, C2 e D2, 25% das entregas foram destinadas para os DLs. Já nos cenários A3, B3, C3 e D3, 45% das entregas foram destinadas para os DLs.

A fim de analisar o potencial ganho com a diminuição de entregas não realizadas com a utilização dos DLs, as mesmas taxas também foram subtraídas das demandas ocasionadas por reentregas. Por exemplo, se do total de entregas realizadas pela transportadora no mês, 10% são ocasionadas devido a reentregas, desse percentual, 10% foram eliminados nos cenários A1, B1, C1 e D1, de forma aleatória para os clientes em que essa situação acontecia, e assim sucessivamente, para todos os demais cenários comparativos, aumentando a proporção a cada cenário. Essa suposição foi desenvolvida a partir de informações obtidas junto a transportadora, que informou que a maioria das entregas não realizadas ocorria porque os clientes estavam no trabalho durante o horário de realização das entregas e, por isso, acabavam se deslocando até a transportadora para retirar o seu pedido. Nesse contexto, considerando que o cliente não estará em casa no horário de realização das entregas, considerou-se que ele faz a opção de retirada no DL mais próximo ao invés de ir a transportadora.

Nos cenários comparativos, a transportadora é considerada como fonte de recurso dos DLs e dos clientes que não fazem uso do *lockers* para retirar suas mercadorias. Os DLs, por sua vez, são modelados como fonte de recurso dos clientes que fazem uso dos *lockers* para retirar suas mercadorias. Todos esses ajustes são realizados por meio da tabela “*Sourcing*” de cada cenário.

Para facilitar o processo de modelagem nesta etapa, os clientes atendidos por cada DL foram reunidos em grupos utilizando a tabela “*Groups*” de cada cenário. Os demais parâmetros de modelagem permaneceram inalterados.

Para fins de comparação e análise, a combinação de cada cenário base com seus respectivos cenários comparativos foram agrupados e nomeados como Grupos de cenários A, B, C e D. A Figura 15 apresenta a lógica de concepção dos cenários.

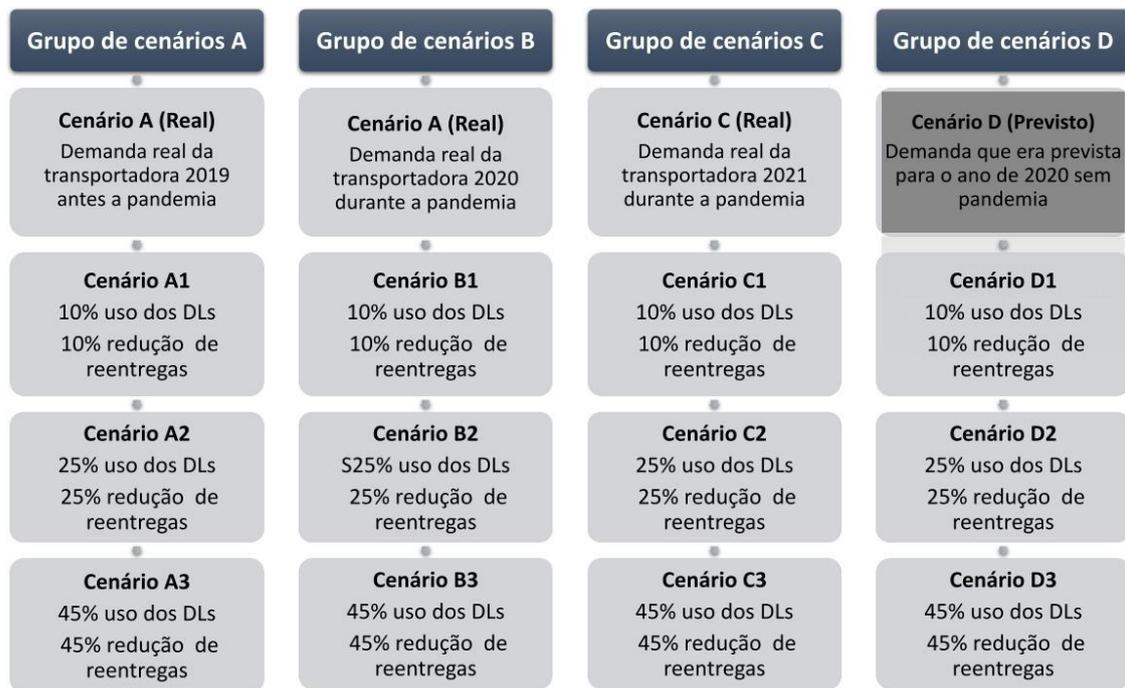


Figura 15- Grupos de cenários

Primeiramente, são apresentados os resultados e comparações dos cenários base (A, B, C e D), que simulam somente entregas em domicílio. Após esta etapa, são apresentados os resultados dos Cenários onde são utilizados DLs para retirada das mercadorias, para cada grupo de cenários. Ao todo foram simulados 16 cenários. Em todos os cenários, a quilometragem percorrida, os volumes transportados, os custos de combustível, as taxas de ocupação dos veículos, o número de viagens e as emissões de CO₂, da transportadora serão analisados como saídas do modelo. Presume-se que a pandemia afetou o processo de entrega das transportadoras e, por meio dos parâmetros simulados, pretende-se mensurar esses impactos. Ao final, esses resultados serão utilizados para calcular os indicadores de desempenho em termos de custo por quilômetro percorrido, volume transportado, pedidos entregues, emissões de CO₂ e da eficiência energética da transportadora.

4.3 Resultados dos cenários base

Para cada cenário, foram simuladas três replicações durante o período de um mês, considerando a demanda de entregas fornecida pela transportadora, conforme análise demonstrada na seção 3.5.5. A Tabela 9 apresenta a quilometragem percorrida pelos veículos, o volume transportado, o gasto com combustível, a ocupação dos veículos, o número de viagens realizadas e as emissões de CO₂, bem como o número de veículos utilizados para realização das entregas em cada cenário base simulado.

Tabela 9- Resultados da simulação

	Real			Previsto
	Cenário A	Cenário B	Cenário C	Cenário D
Quilometragem média percorrida (Km)	4835,26	9959,24	6056,6	5965,56
Volume médio transportado (m ³)	1226,60	2678,60	1511,10	1470,90
Média de gasto com combustível (R\$)	1497,74	2606,83	1961,31	1685,92
Número médio de viagens	227	675	252	263
Emissão média de CO ₂ (Kg)	1096,24	1544,49	1134,44	1206,88
Taxa de ocupação média dos veículos	0,68	0,82	0,77	0,72
Nº de veículos utilizados na simulação do cenário	3	4*	3	3

*Adição de uma motocicleta na frota da transportadora

Para o caso estudado, a análise comparativa dos cenários A, B, C e D revelou uma série de observações interessantes sobre como a pandemia da COVID-19 impactou as operações do TUC do *e-commerce*. Antes da pandemia (Cenário A), a taxa de ocupação dos veículos estava em torno de 68%. No entanto, durante a pandemia (Cenário B), houve um aumento expressivo na demanda, que ultrapassou 100%. Para atender a essa demanda, os veículos aumentaram sua taxa de ocupação (82%). Essa taxa de ocupação seria ainda maior caso não houvesse a inclusão de novos veículos na frota para auxiliar nas entregas. Haveria o risco de que a necessidade de espaço para realização das entregas, excedesse a capacidade dos veículos, gerando atrasos nas entregas ou o não atendimento da demanda pela transportadora.

Devido ao aumento da demanda de entregas, houve um aumento nos gastos com combustível de 75% e na quilometragem percorrida de 106%. Mesmo com o melhor

aproveitamento da capacidade dos veículos e devido ao horário de funcionamento da transportadora, foram realizadas mais viagens para atender ao aumento da demanda, ampliando as distâncias percorridas e os gastos com combustível. O aumento das distâncias percorridas pelos veículos para atender a esse aumento da demanda, gerou um aumento das emissões de CO₂ de 41%. Esse gasto pode ser atribuído a uso da motocicleta para auxiliar nas entregas neste cenário.

Em um cenário de aumento da demanda de entregas, as motocicletas podem ter um impacto negativo significativo nas emissões de CO₂ devido à sua baixa capacidade de carga e ao grande número de viagens que realizam. Como esses veículos têm uma capacidade de carga limitada em comparação com veículos maiores, como as *pickups* ou caminhões, elas geralmente precisam fazer mais viagens para atender à mesma demanda de entrega. Cada viagem adicional aumenta o consumo de combustível e, conseqüentemente, as emissões de CO₂. Além disso, o peso adicional das cargas pode diminuir a eficiência do combustível das motocicletas, tornando cada viagem mais poluente. Portanto, o uso extensivo de motocicletas para entregas em cenários de aumento da demanda de *e-commerce* pode contribuir para o aumento das emissões de CO₂, exacerbando os problemas de poluição do ar e contribuindo para as mudanças climáticas.

A comparação entre o cenário A (sem pandemia) e o cenário D (sem pandemia, com crescimento de 20%) mostra que, mesmo sem a pandemia, o aumento da demanda de entregas, teria impactado na taxa de ocupação da frota, permitindo o aumento da ocupação dos veículos. Embora esse aumento da ocupação não seja tão significativo como no período de pandemia, a aquisição de novos veículos não teria sido necessária, já que a capacidade ociosa da frota poderia ter sido utilizada. Haveria um aumento da quilometragem percorrida de 23% para atender ao aumento da demanda, conseqüentemente, o gasto com combustível aumentariam em 13%. O número de viagens aumentaria em 16%, pois mesmo com a melhora da ocupação da capacidade da frota, ainda haveria a restrição do horário de funcionamento da transportadora. Essa restrição geraria a necessidade da realização de mais viagens para atender a demanda das entregas. Isso por sua vez, levou ao aumento do número de viagens para realização das entregas e conseqüentemente da quilometragem percorrida pelos veículos.

No cenário C (referente ao ano de 2021), houve uma diminuição da demanda de entregas em comparação ao ano anterior (referente ao ano de 2020). A quilometragem percorrida e o volume transportado diminuíram aproximadamente em 37% e 44%, respectivamente. O número de viagens diminuiu em 63% e, com isso, o gasto com combustível e as emissões também diminuíram em aproximadamente 30%. Devido a diminuição da demanda, houve uma diminuição da densidade de entregas (número de pedidos em cada rota). Conseqüentemente, a quilometragem percorrida e volumes transportados em cada rota também diminuíram. Isso, por sua vez, ocasionou

menores gastos com combustível e emissões de CO₂. Pode-se supor que houve uma diminuição das externalidades negativas geradas no ambiente urbano. A taxa de ocupação da frota da transportadora diminuiu. Isso indica que, com a retomada gradual das atividades presenciais e a flexibilização das medidas de distanciamento, parte do aumento da demanda do *e-commerce* durante a pandemia foi revertida.

Esses resultados estão alinhados com as dinâmicas observadas durante a pandemia, quando o *e-commerce* experimentou um aumento substancial na demanda devido às restrições de movimentação e ao aumento das compras online (MAVI *et al.*, 2022; SAKAI *et al.*, 2022; BUDEL RAI *et al.*, 2022; MILEWSKI *et al.*, 2021; STRAUBINGER *et al.*, 2023). À medida que a situação se normalizou e as atividades presenciais foram retomadas, parte desse aumento na demanda se reverteu. Essas observações oferecem informações valiosas para empresas que buscam planejar suas operações de entrega em um ambiente volátil e dinâmico. A utilização de ferramentas de apoio a decisão pode auxiliar nessas situações, contribuindo para o planejamento das operações e análise da real necessidade de investimentos, amenizando os impactos sobre as operações e custos.

Esses resultados estão alinhados com as descobertas de Holguín-Veras *et al.* (2021), ao sugerirem que, com a gradual retomada das atividades presenciais e a flexibilização das medidas de controle não farmacológicas, seria provável que parte do aumento na demanda de entregas do comércio eletrônico durante a pandemia fosse revertida, especialmente se a pandemia se transformasse em uma endemia. Isso implica que alguns investimentos realizados pelas empresas de transporte e varejo para atender a essa demanda poderiam se tornar obsoletos.

4.4 Resultados da implantação dos DLs

Com os *lockers* localizados, além dos 4 cenários base foram simulados mais 12 cenários para avaliar a implantação desta iniciativa de *City logistics*. Para isso, foram considerados os parâmetros de 10, 25 e 45% para variação de entregas nos DLs e a distância máxima de 2 km, conforme análises demonstradas no capítulo 4.2.1. A Tabela 10 apresenta os resultados das simulações para cada grupo de cenários.

Tabela 10- Comparação dos cenários

	Distância média percorrida (Km)	Volume médio transportado (m³)	Gasto médio com combustível (R\$)	Número médio de viagens	Emissão média de CO2 (Kg)	Taxa de ocupação média dos veículos
Cenário A	4835,26	1226,00	1497,74	227,00	1096,24	0,68
Cenário A1	4745,08	1212,00	1383,74	210,00	1022,11	0,72
Cenário A2	4197,64	1181,00	1164,85	191,00	861,33	0,76
Cenário A3	3722,26	1105,00	885,84	179,00	650,59	0,79
Cenário B	9559,24	2678,00	2606,83	675,00	1544,49	0,82
Cenário B1	9441,23	2633,00	2409,69	643,00	1437,44	0,84
Cenário B2	8408,98	2586,00	2164,83	535,00	1338,21	0,86
Cenário B3	6882,54	2503,00	1446,93	501,00	654,59	0,93
Cenário C	6056,60	1511,00	1761,31	252,00	1134,44	0,77
Cenário C1	5723,77	1478,00	1631,97	231,00	1085,56	0,81
Cenário C2	5200,80	1441,00	1394,68	219,00	927,52	0,84
Cenário C3	4931,18	1406,00	1108,89	201,00	751,64	0,88
Cenário D	5965,56	1470,00	1685,92	263,00	1206,88	0,72
Cenário D1	5732,10	1449,00	1565,01	241,00	1121,40	0,76
Cenário D2	5547,81	1408,00	1327,64	228,33	958,24	0,78
Cenário D3	4681,76	1329,00	1031,23	209,33	756,26	0,81

Os resultados demonstram que o uso de métodos de apoio a decisão para avaliação medidas de *City logistics*, especificamente o uso dos DLs, revelaram um impacto positivo para as operações do TUC do *e-commerce*. Em todos os cenários simulados, a implantação dos DLs resultou em uma redução da distância percorrida pelos veículos para realização das entregas. Isso é especialmente evidente em cenários de maior utilização dos DLs e durante o acontecimento de um evento disruptivo.

Observou-se uma redução da distância percorrida pelos veículos que variou de 4 a 28% nos cenários do Grupo B. Neste mesmo grupo de cenários, houve uma redução no número de reentregas, que permitiu a diminuição do volume médio transportado variando de 2 a 7%. Os gastos com combustível também reduziram entre 8 e 44%. Com a maior consolidação das cargas proporcionada pelo maior uso dos DLs, a redução do número de viagens variou entre 5 e 26%. Consequentemente, devido a diminuição das viagens, as emissões de CO₂, também diminuíram entre 7 e 58%, neste mesmo grupo de cenários. Observou-se um potencial de melhora da ocupação dos veículos, que aumentou de 82% (no Cenário B) para 93% (no Cenário B3).

A implantação dos DLs para o caso estudado permitiu a consolidação e direcionamento mais eficaz das cargas, o que, por sua vez, levou a uma redução do número de reentregas

necessárias. Isso resultou em menor volume médio transportado, uma economia de recursos e uma entrega mais eficiente em todos os cenários simulados (com e sem pandemia). Com a redução do número de viagens e da distância percorrida, os gastos com combustível diminuíram significativamente. Além disso, a redução das emissões de CO₂ contribuíram para uma operação mais sustentável. O direcionamento dos pedidos para os DLs também possibilitou uma melhora na ocupação dos veículos de entrega, otimizando o uso de recursos e reduzindo custos operacionais. Os resultados demonstram que, à medida que a demanda de entregas aumenta, os ganhos se ampliam com o direcionamento das entregas para essas instalações, proporcionando benefícios adicionais em termos de redução de distância, economia de combustível, redução de emissões e melhora na ocupação de veículos. Entretanto, alguns incentivos monetários por parte das transportadoras são necessários para incentivar a adesão dos clientes ao uso dos DLs (ALVES *et al.*, 2023).

Esses resultados confirmam que as medidas de *City logistics*, como o uso de DLs, desempenham um papel importante na melhoria das operações de entrega do *e-commerce* (SILVA *et al.*, 2020). Essas iniciativas não apenas melhoram a eficiência operacional e a sustentabilidade das operações, mas também têm o potencial de economizar recursos significativos e melhorar a qualidade de vida nas áreas urbanas, reduzindo o congestionamento e a poluição (MILESWKI *et al.*, 2021). Portanto, investir em ferramentas de apoio à decisão, que permitam a avaliação do uso de iniciativas de *City logistics* pode ser uma estratégia valiosa para empresas de *e-commerce* que desejam atender as variações de demanda de forma eficaz e responsável (ALVES *et al.*, 2021; HOLGUÍN-VERAS *et al.*, 2023).

A Tabela 11 apresenta um resumo dos ganhos obtidos em cada um dos cenários simulados.

Tabela 11- Ganhos obtidos em cada cenário simulado com a implantação dos DLs em relação aos cenários A, B, C e D

Cenários	A/A1	A/A2	A/A3	B/B2	B/B3	B/B4	C/C1	C/C2	C/C3	D/D1	D/D2	D/D3
Distância média percorrida (Km)	-4%	-13%	-22%	-4%	-12%	-28%	-5%	-14%	-19%	-4%	-7%	-23%
Volume médio transportado (m ³)	-2%	-4%	-10%	-2%	-3%	-7%	-2%	-5%	-7%	-2%	-4%	-10%
Gasto com combustível	-8%	-22%	-39%	-8%	-17%	-44%	-7%	-21%	-37%	-7%	-21%	-41%
Número de viagens	-7%	-16%	-21%	-5%	-21%	-26%	-8%	-13%	-20%	-8%	-13%	-22%
Emissões de CO ₂ (Kg)	-7%	-21%	-37%	-7%	-13%	-58%	-4%	-18%	-34%	-7%	-21%	-41%
Taxa de ocupação dos veículos	+4%	+8%	+11%	+2%	+5%	+13%	+5%	+9%	+14%	+6%	+8%	+13%

4.4.1 Análise de indicadores e custos

A fim de demonstrar algumas análises possíveis com os resultados obtidos com a aplicação do DISRUPSIM na implantação de iniciativas de *City logistics*, como o uso dos DLs, foram calculados os seguintes indicadores: custo por volume transportado, emissões de CO₂, pedidos entregues e quilometragem. A Figura 16 demonstra os resultados desses indicadores para cada grupo de cenários simulados em termos de R\$/m³, R\$/KgCO₂, R\$/Km e custo por pedidos entregues. A relativização desses indicadores em relação a quilometragem percorrida pode ser encontrada em Silva *et al.*, (2024).

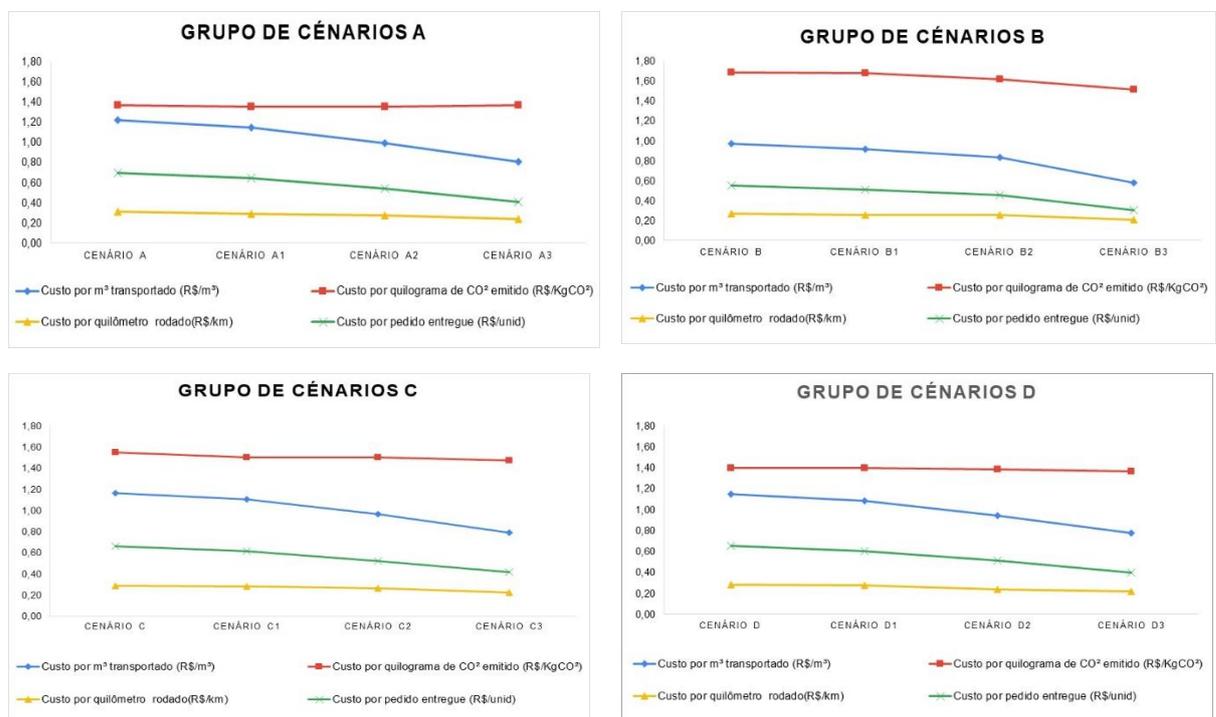


Figura 16- Análises dos indicadores

Os resultados destacam os benefícios significativos associados ao uso de DLs no contexto do transporte urbano de cargas no *e-commerce*. A implantação dessa iniciativa para o caso estudado, levou a uma redução nos custos operacionais por metro cúbico transportado, pedido entregue e quilômetro rodado. Essa economia é especialmente acentuada em cenários de maior demanda (pandemia), onde os ganhos operacionais são ainda mais substanciais.

No Grupo de cenários B, observou-se uma redução do custo por volume transportado de até 40% (de 0,97 R\$/m³ para 0,58 R\$/m³) com a utilização dos DLs. Já no grupo de cenários C, observou-se uma redução de até 33% (de 1,17 R\$/m³ para 0,78 R\$/m³), para a mesma variável. A relação de custo por pedido diminuiu em até 44% (de R\$ 0,55 para R\$ 0,31) nos

cenários do Grupo B e em até 37 % (de R\$ 0,66 para R\$0,42) nos cenários do Grupo C. A redução do custo por quilômetro foi de até 33% (de 0,27 R\$/km para 0,21 R\$/km) no Grupo de cenários B e de até 37% (de 0,30 R\$/km para 0,22 R\$/km) no Grupo de cenários C.

O uso de DLs também resultou na redução nos custos das emissões de CO₂. No Grupo de cenários B, observou-se que o custo de emissão de CO₂ diminuiu em até 12% (de 1,69 R\$/KgCO₂ para 1,52 R\$/KgCO₂). Já no grupo de cenários C, o custo da emissão de CO₂ reduziu em até 7% (de 1,55 R\$/KgCO₂ para 1,46 R\$/KgCO₂). Esses indicadores são fundamentais para empresas que desejam adotar práticas mais sustentáveis e contribuir para a redução de emissões.

A redução do custo por volume transportado é notável, indicando uma utilização mais eficiente do espaço disponível nos veículos de entrega. A relação custo por pedido entregue também diminuiu, o que é fundamental para melhorar a rentabilidade das operações. Os resultados demonstram que, à medida que a demanda por entregas aumenta e há uma maior utilização dos DLs, os benefícios se ampliam, resultando em reduções de custo mais significativas e na melhoria da sustentabilidade das operações. Além de economizar recursos financeiros e ambientais, a implantação dessa iniciativa para a aplicação estudada, melhorou a eficiência geral das operações de transporte, permitindo uma melhor utilização da capacidade dos veículos, mesmo em cenários de demanda normalizada.

Esses resultados fornecem evidências sólidas de que iniciativas de *City logistics*, como o uso dos DLs, são estratégias eficazes para melhorar o TUC do *e-commerce*. Além de reduzir os custos operacionais, essa iniciativa apresentou um potencial de contribuição significativo para a melhoria geral das operações de entrega, beneficiando as empresas, os clientes e o meio ambiente. Portanto, essas descobertas incentivam a adoção de soluções de *City logistics* como parte integrante das estratégias do TUC do *e-commerce*.

Como o objetivo de analisar a eficiência energética da transportadora, foi calculada a eficiência energética (CEE) em termos de pedido entregue e volume (m³) para cada grupo de cenários simulados, utilizando os resultados das simulações e considerando uma capacidade diária de 200 entregas/dia antes da pandemia e 250 entregas/dias durante a pandemia, conforme informações fornecidas pela transportadora. Os cálculos foram realizados conforme a Equação de eficiência energética (Equação 11) e os resultados são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12- Custo de energia

	Cenário A	Cenário A1	Cenário A2	Cenário A3
CPP (pedido)	2,37	1,74	1,64	1,55
CPP (m ³)	9,65	7,34	5,97	4,60
	Cenário B	Cenário B1	Cenário B2	Cenário B3
CPP (pedido)	3,19	2,70	2,49	2,17
CPP (m ³)	11,49	9,14	7,73	4,65
	Cenário C	Cenário C1	Cenário C2	Cenário C3
CPP (pedido)	2,39	2,00	1,86	1,90
CPP (m ³)	10,32	8,16	6,66	5,54
	Cenário D	Cenário D1	Cenário D2	Cenário D3
CPP (pedido)	2,27	1,87	1,89	1,73
CPP (m ³)	9,62	7,40	6,61	4,98

Conforme observa-se nos resultados, o uso dos DLs apresenta ganhos para todos os cenários simulados. Para o grupo de cenários sem pandemia, a redução da eficiência energética pode chegar a 52% no grupo de Cenários A e 49% no grupo de cenários D. Já nos cenários com pandemia, a redução pode chegar a 60% no grupo de cenários B e 47% no grupo de cenários C. Observa-se que por meio da implantação dos, principalmente nos cenários de alta demanda e maior utilização dos DLs, a transportadora chegou a uma melhoria da eficiência energética significativa, chegando a valores próximos ao dos cenários sem pandemia. O maior direcionamento das cargas para essas instalações, possibilitou o melhor aproveitamento da capacidade ociosa da frota e o aumento do número de entregas em cada rota, melhorando a eficiências das operações. Essa melhoria traz efeitos diretos sobre as operações de entrega da transportadora e sobre o fluxo de veículos nas vias urbanas, proporcionando uma melhoria na mobilidade urbana e colaborando para a redução da emissão de gases de efeito estufa. Além disso, também pode levar a uma potencial melhoria nos indicadores de qualidade do ar. Entretanto, a utilização dos DLs pode não ser tão simples, já que a maioria dos clientes está acostumada à comodidade das entregas em domicílio.

Uma estratégia que pode favorecer a adesão dessa iniciativa, pode ser uma janela de atendimento mais conveniente para os clientes, uma vez que os horários de entrega das transportadoras, na maioria das vezes, coincidem com o seu horário de trabalho (ALVES *et al.*, 2023). Este conceito apresenta duas vantagens para as transportadoras (ARNOLD *et al.*, 2018): i) a redução no número de entregas, uma vez que menos clientes precisam ser visitados e, ii) a redução no número de pedidos não entregues quando os clientes, que passam a maior parte do

tempo em seus trabalhos, estão ausentes de suas residências e escolhem a opção de retirar seu pedido no DL.

Outra estratégia que pode ser utilizada pelas transportadoras para incentivar a adesão dos clientes ao uso dos DLs é a precificação. Por exemplo, ao utilizar DLs como as transportadoras irão consolidar e distribuir cargas de maneira mais eficiente e, conseqüentemente, reduzirão seus custos operacionais. Como estratégia de incentivo ao uso dos *Lockers*, essas transportadoras poderiam repassar parte dessa economia aos clientes. Isso pode ser feito por meio de redução ou desconto no valor do frete cobrado, oferta de descontos ou tarifas mais baixas para entregas realizadas em determinados horários ou locais que sejam atendidos de forma mais eficiente pelos DLs para induzir a mudança de comportamento do cliente. Trabalhos como os de Budel Rai *et al.* (2021) e Holguin-Veras *et al.*, (2018), buscam entender os fatores que podem levar a essa mudança comportamental dos clientes. Além de contribuir para a melhorias das operações e da eficiência energética das transportadoras, a implantação dessa iniciativa também pode gerar uma renda extra para as organizações que as hospedam, aumentar a venda de produtos e visibilidade desses estabelecimentos e estender prontamente a cobertura de atendimento das empresas de transporte sem grandes investimentos de capital (OLIVEIRA *et al.*, 2017). Entretanto, uma análise completa desses fatores e dos aspectos comportamentais dos clientes, está além do escopo desta tese.

Observa-se que o uso da ferramenta proposta, permitiu a contabilização de indicadores que podem ser utilizados pelas transportadoras na avaliação do desempenho de suas operações de entrega e no apoio à decisão, a fim de planejar e/ou readaptar seus métodos de entrega durante eventos disruptivos. A mesma pode ser adaptada para outras transportadoras com operações similares para promoção de resiliência e para análise e tomada de decisão em tempo real. Isso por sua vez, também pode possibilitar o ganho de competitividade da transportadora em relação aos seus concorrentes, possibilitando o maior aproveitamento dos recursos da empresa e melhoria do seu consumo energético, aumentando assim, sua eficiência na prestação de serviços de entrega. Ao utilizar o DISRUPSIM para analisar iniciativas de *City logistics*, as transportadoras podem testar diferentes opções de entrega para atender seus clientes. Os resultados demonstram que explorar o uso dessas iniciativas é útil para clientes e transportadoras, pois oferecem mais flexibilidade, melhoria nas operações de entrega, redução de custos e emissões.

5 DISCUSSÕES

Este capítulo tem como objetivo discutir os resultados da aplicação do DISRUPSIM respondendo às perguntas de pesquisa apresentadas no capítulo de introdução desta tese. Primeiramente, será demonstrado como a modelagem e simulação pode ser utilizada como ferramenta de apoio a decisão pelas transportadoras do *e-commerce* durante eventos disruptivos. Após isso, será evidenciado como essa ferramenta pode ser utilizada na avaliação da implementação de iniciativas de *City logistics* para amenizar os impactos nas operações de entregas. Ao final da discussão, serão exploradas as contribuições dessas práticas para a sustentabilidade das operações, destacando a importância de estudos que investiguem ferramentas de apoio a decisão para melhorar o planejamento das operações de transporte do comércio eletrônico frente aos desafios logísticos contemporâneos.

A ferramenta de apoio à decisão DISRUPSIM, desenvolvida a partir de um modelo de simulação híbrida, demonstrou o impacto significativo que eventos disruptivos podem exercer sobre as operações logísticas das transportadoras. A comparação entre os cenários propostos, permitiu a reprodução da dinâmica observada durante um evento disruptivo, demonstrando os impactos sobre a quilometragem percorrida, custos com combustível, emissão de poluentes, número de viagens e capacidade de carga das transportadoras. Embora a aplicação deste estudo tenha ocorrido em apenas uma transportadora, observa-se que o comportamento de um evento disruptivo e seus impactos sobre as operações são semelhantes em diversos países, principalmente no Brasil. As operações de entrega das transportadoras do *e-commerce* também são semelhantes, principalmente, quando essas estão contidas dentro de uma rede de filiais que contém procedimentos padrão, como o caso estudado. Portanto, as análises realizadas neste estudo podem ser extrapoladas para outras transportadoras.

Os resultados da aplicação da ferramenta em cenários sem pandemia destacaram a subutilização da capacidade da frota, evidenciada por uma taxa de ocupação dos veículos em torno de 68%. Realidade essa, observada em muitas transportadoras, que para atender a demanda de entregas de forma cada vez mais rápida, acabam não planejando corretamente suas operações e conseqüentemente, não aproveitam a capacidade total de sua frota (SILVA *et al.*, 2021; SOUSA *et al.*, 2022, LEE *et al.*, 2022). Essa subutilização, gera impactos operacionais e ambientais, que poderiam ser evitados, caso fosse devidamente gerenciada. Por exemplo, com a melhor ocupação dos veículos, as emissões de CO₂ poderiam ser reduzidas se mais entregas fossem realizadas dentro da mesma rota, isso por sua vez, também contribuiria para a diminuição da quilometragem percorrida pelos veículos da transportadora. Além disso,

conforme sugerido por Mavi *et al.* (2022), com o volume transportado mais próximo da capacidade máxima dos veículos, resultaria na diminuição dos custos com combustíveis, uma vez que os veículos estariam sendo mais bem aproveitados (HOLGUÍN-VERAS *et al.*, 2021). Os resultados da presente tese demonstram a oportunidade de um melhor aproveitamento da capacidade ociosa das operações, que poderia diminuir os custos da transportadora e as externalidades geradas sobre o ambiente urbano (DE LA TORRE *et al.*, 2021).

Com a pandemia e o aumento expressivo da demanda de entregas, ficou evidente a subutilização da frota. Nos cenários que simulam esse evento disruptivo, percebe-se o aumento na quilometragem, nos gastos com combustível, e conseqüentemente nas emissões de CO₂, que chegaram a duplicar em alguns casos. Neste sentido Silva *et al.* (2021), demonstraram que as transportadoras tentando atender a esse aumento expressivo e inesperado da demanda acabaram por, além de utilizar melhor a ocupação de sua frota, adquirir novos veículos. Investimento esse, que poderia ser evitado, se as transportadoras utilizassem uma ferramenta de apoio a tomada de decisão como a desenvolvida nesta tese, uma vez que os resultados demonstram que utilizando a capacidade ociosa dos caminhões seria desnecessário a aquisição de novos veículos.

Além disso, com a retomada gradual das atividades presenciais e a flexibilização das restrições farmacológicas impostas pela pandemia, houve uma diminuição na demanda por entregas. Isso tornou os investimentos realizados durante esse período ainda mais dispensáveis. Esses aspectos destacaram a importância de se ter uma operação enxuta, que maximize a utilização dos recursos e minimize os impactos econômicos e ambientais, durante eventos disruptivos (CUNHA *et al.*, 2023). Conforme demonstrado neste estudo, o uso do DISRUPSIM pode auxiliar no planejamento e na gestão das operações antes, durante e após o acontecimento de um evento disruptivo, evitando o investimento em novos veículos, que poderão se tornar desnecessários ou dispensáveis após o término desses eventos (HOLGUÍN-VERAS *et al.*, 2021). Isso destaca a importância das ferramentas de tomada de decisão na gestão desses eventos, e um exemplo disso foi a ferramenta apresentada por Calnan *et al.* (2018) durante a crise do Ebola, os autores desenvolveram e implementaram estratégias eficazes e políticas operacionais para responder à demanda e que permitam o retorno à normalidade, sem investimentos desnecessários.

Nos resultados apresentados fica evidente que apesar dos desafios enfrentados pelas transportadoras ao reorganizarem-se durante o início da pandemia, foram obtidos benefícios notáveis, especialmente nos cenários onde há o aumento da demanda de entregas. Estes benefícios incluem a redução dos custos de: emissão de CO₂, de pedidos entregues, de volume transportado e quilometro rodado. Isso pode ser explicado pelo aumento da densidade de

entregas em cada região, que resultou em um menor tempo gasto para se deslocar entre os clientes, possibilitando o atendimento de mais clientes em uma única rota (ARNOLD *et al.*, 2018). Esse resultado reforça a ideia de que a eficiência operacional é maximizada em cenários com maior densidade de pedidos, destacando a importância de estratégias operacionais para lidar com o aumento da demanda de entregas.

A aplicação da ferramenta foi capaz de demonstrar que o uso de medidas de *City logistics*, especificamente o uso de DLs, para o caso estudado, traz impactos expressivos em diversos aspectos operacionais e ambientais. Os resultados destacaram que a introdução dos DLs, permitiu uma consolidação e direcionamento mais eficiente das cargas, reduzindo o número de reentregas e o volume transportado, o que corrobora com os achados de Leung *et al.* (2023).

Os cenários com maior utilização de DLs apresentaram a redução do número de viagens, da distância percorrida e uma economia de combustível significativa, além de uma notável diminuição das emissões de CO₂ e da melhoria da eficiência energética das operações como um todo. Esses resultados, vão ao encontro dos apresentados por Alves *et al.* (2023) e Milewski *et al.* (2021), reafirmando que a adoção estratégias de entrega mais eficientes pelas transportadoras, como o uso dos DLs, reduzem os custos operacionais e promovem a sustentabilidade das operações do transporte urbano de TUC do *e-commerce*. É importante ressaltar que embora existam pesquisas sobre o uso dos DLs no Brasil, os ganhos na prática ainda não são observados, devido ao seu uso pequeno e recente. Esses estudos se concentram, principalmente, no Distrito Federal, Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo (OLIVEIRA *et al.*, 2019; ALVES *et al.*, 2019; ALVES *et al.*, 2022; MASTEGUIM e CUNHA, 2022).

Nesse contexto, a utilização do DISRUPSIM como ferramenta de apoio à decisão para avaliar e testar medidas de *City logistics* no transporte urbano de cargas do *e-commerce* mostrou-se como uma ferramenta relevante para o contexto atual das operações logísticas. Com a disseminação do comércio eletrônico, as demandas por entregas urbanas têm crescido exponencialmente, o que traz consigo uma série de desafios logísticos. O DISRUPSIM pode auxiliar as empresas a contornar esses desafios de forma mais eficiente. Esta ferramenta permite que as empresas avaliem o desempenho de diferentes estratégias antes de implementá-las, proporcionando uma tomada de decisão mais assertiva e sem a necessidade de investimentos prévios. O uso dessa ferramenta, que tem como base de funcionamento a modelagem e simulação, possibilitando que as empresas melhorem seus processos de entrega, proporcionando um serviço de alta qualidade, especialmente durante eventos disruptivos, onde a eficiência operacional é essencial (PAVLOV *et al.*, 2022).

O DISRUPISIM pode ainda ser adaptado para a utilização em períodos de normalidade, auxiliando as transportadoras a enfrentarem as constantes transformações impostas pela logística urbana, como: atualizações nas regulamentações de tráfego e de emissões, mudanças de infraestrutura e flutuações de demanda (ABUDUREHEMAN E NILUPAER, 2021). O uso desta ferramenta, oferece às empresas a flexibilidade necessária para ajustar suas estratégias operacionais de acordo com as necessidades específicas e as exigências do ambiente urbano em constante evolução, conforme os resultados e análise demonstrados neste trabalho. A utilização e o desenvolvimento de ferramentas como o DISRUPSIM, são parte do futuro do planejamento de transporte para manter a resiliência das operações, onde as decisões deverão ser cada vez mais, tomadas em tempo real frente a situações inesperadas e a previsão torna-se cada vez mais difícil.

À medida que a sustentabilidade emerge como uma prioridade para as transportadoras do comércio eletrônico, o DISRUPSIM também se destaca como uma ferramenta valiosa para avaliar e mitigar o impacto ambiental de suas operações de transporte. Seu uso pode permitir uma análise abrangente que inclui a avaliação de iniciativas, como a adoção de veículos elétricos, drones, bicicletas de carga e a otimização de rotas, visando minimizar as emissões de carbono e reduzir o consumo de combustível. Portanto, a ferramenta não apenas contribui para a eficiência operacional e a redução de custos das transportadoras, mas também para a melhoria da qualidade de vida nas comunidades urbanas. Ao promover práticas sustentáveis e minimizar o impacto ambiental das operações de transporte, o DISRUPSIM beneficia tanto as empresas quanto as comunidades urbanas, demonstrando seu potencial para promover uma gestão logística mais eficiente e sustentável.

6 CONCLUSÕES

O objetivo desta tese foi desenvolver e disponibilizar uma ferramenta de apoio à decisão para promoção da resiliência do transporte urbano de cargas do *e-commerce* durante eventos disruptivos. Esse objetivo foi alcançado por meio do desenvolvimento e aplicação do DISRUPSIM, que contribuiu diretamente para o apoio à decisão nas áreas de Engenharia de Produção e Transportes, particularmente em Logística Urbana.

Com a combinação de abordagens de simulação por meio de Simulação Híbrida foi possível representar o funcionamento das entregas de uma transportadora do *e-commerce*. Essa integração permitiu extrair as vantagens de cada abordagem de simulação utilizada, possibilitando modelar as particularidades do sistema em um único *software*, e apresentar a ferramenta DISRUPSIM. Houve a preocupação ao construir a ferramenta, em representar a realidade das transportadoras, para fins de comparação e análise.

A ferramenta desenvolvida é extensa e foi implementada no *software* de simulação *Anylogistix*®. Ao todo foram gastos aproximadamente 12 meses para desenvolvimento e calibração do modelo e para simulação dos cenários. Foram realizadas três replicações para cada grupo de cenários (48) e para cada um dos seis cenários considerados na análise de sensibilidade, totalizando 66 cenários simulados. O tempo para coleta dos dados para simulação e validação do modelo junto a transportadoras durou aproximadamente 3 meses. Com o modelo devidamente validade e após a construção dos cenários, buscou-se analisar os impactos gerados pelo aumento da demanda de entregas e investigar uma solução para entregas da última milha do comércio eletrônico em termos de quilometragem percorrida, custos, emissão de poluentes, número de viagens e capacidade de carga. Dada a complexidade do sistema estudado, a ferramenta demonstrou resultados coerentes com a realidade das transportadores durante eventos disruptivos, permitindo a representação cenários antes e durante a pandemia.

O uso da Simulação Híbrida, utilizando Simulação Baseada em Agentes (SBA) e Simulação a Eventos Discretos (SED), é justificado pelo grande número de variáveis, que precisam ser estudadas de maneira conjunta e sistêmica, avaliando suas interações. A SBA possibilitou a reprodução dos comportamentos de cada agente no modelo simulado. Já a SED possibilitou a reprodução das operações realizadas por cada um desses agentes, de forma discreta. Isso tornou possível modelar particularidades de um determinado sistema que, muitas vezes, não são possíveis de serem estudadas com Simulação a Eventos Discretos ou Baseadas em Agentes, ou são, ainda, de difícil análise e modelagem.

Diante dos parâmetros de localização e taxa de utilização dos DLs, para a aplicação estudada, utilizou-se da técnica de Projeto de Experimentos (DoE) para medir o grau de relevância desses fatores e seus impactos no sistema, visando a construção de cenários comparativos. O uso dessa técnica permitiu a redução do número de cenários simulados, sendo esse um ganho para a ferramenta apresentada, dada a complexidade do modelo e o tempo computacional relativamente alto para se executar um novo cenário.

Para definir o escopo e a natureza inovadora do tema, conduziu-se uma pesquisa abrangente sobre o transporte urbano de cargas relacionado ao *e-commerce* e sua operação em eventos disruptivos, assim como sobre a modelagem e simulação aplicadas à logística e ao transporte. Isso permitiu a delimitação do objeto de pesquisa e da metodologia a ser empregada no desenvolvimento do estudo. Após essa delimitação, o processo de construção e aplicação do DISRUPSIM envolveu três etapas distintas: desenvolvimento, implementação e análise dos resultados.

Na etapa de desenvolvimento, foram realizadas as fases de modelagem das operações e interações de cada agente envolvido. Para garantir uma compreensão aprofundada, foram conduzidas reuniões com especialistas da área, visando entender, conceituar e validar o funcionamento da ferramenta. Na segunda etapa, o estudo foi aplicado a um caso específico de uma transportadora, utilizando dados reais como base. Por fim, na terceira etapa, procedeu-se à análise dos resultados. Essa análise foi fundamentada na criação de cenários comparativos, os quais exploraram uma medida de *City logistics*, os *Delivery Lockers*.

Inicialmente foram simulados quatro cenários base. O cenário A, representou as entregas realizadas pela transportadora para o ano de 2019, antes da ocorrência da pandemia. Os cenários B e C, representaram as entregas realizadas pela transportadora nos anos de 2020 e 2021, durante a pandemia. Já o cenário D, representou um cenário com a previsão de crescimento para o *e-commerce* no ano de 2020, caso não houvesse pandemia. Todos os cenários consideraram o mês de junho como referência. Como esperado, os resultados mostraram que as demandas por entregas aumentam consideravelmente durante eventos disruptivos, resultando em um aumento da quilometragem percorrida, volumes transportados, gastos com combustível, número de viagens e emissões de CO₂ das transportadoras. A transportadora, mesmo com a capacidade da frota ociosa, acabou por adquirir mais veículos para auxiliar na realização das entregas. No entanto, observou-se um potencial de melhoria da ocupação dos veículos, que poderia eliminar a necessidade desse investimento.

Conforme evidenciado durante as análises realizadas com a aplicação da ferramenta, o gerenciamento da capacidade da frota é uma oportunidade estratégica para as transportadoras,

pois elimina a necessidade da aquisição de novos veículos e possibilita melhorias para toda operação. Com a melhor ocupação dos veículos, menos viagens são necessárias para realização das entregas, conseqüentemente, menos quilômetros são percorridos pelos veículos e os gastos com combustível também são menores. Há também uma redução significativa nos custos e nas emissões de CO₂ das transportadoras, melhorando a sustentabilidade e a eficiência das operações.

Outros cenários comparativos também foram simulados, considerando a implantação e o uso dos DLs. A implantação dessa iniciativa de *City logistics*, apresentou melhorias em termos de custo por quilometragem percorrida, emissão de poluentes, pedidos entregues e volume transportado. A consolidação e direcionamento mais eficiente das cargas, resultou na economia dos recursos da transportadora e em entregas mais eficientes. Pela comparação de diferentes cenários, constatou-se que a implantação dos DLs pode apresentar ganhos para as operações das transportadoras, tanto durante períodos disruptivos, como em períodos de normalidade da demanda. Nesse contexto, o incentivo da adesão dos clientes aos DLs, por parte das transportadoras, representa uma alternativa promissora para melhorar as operações de entregas do *e-commerce*, pois, quando estrategicamente implementada, possibilita ganhos para toda a operação.

De acordo com os resultados apresentados, existem oportunidades para aumentar a eficiência energética das entregas em todos os cenários simulados. Além disso, durante eventos disruptivos, os resultados são ainda mais visíveis. Quando o mercado de comércio eletrônico cresce, como durante a pandemia, a eficiência energética das entregas em conjunto com a aplicação de iniciativas como os DLs, também pode aumentar em até 60%. Nesse contexto, ao adotar o DISRUPSIM, as transportadoras do *e-commerce* podem aperfeiçoar a eficiência operacional, resultando em entregas mais rápidas e menos onerosas. Além disso, podem minimizar o impacto ambiental, contribuindo para a sustentabilidade e respondendo às expectativas de clientes preocupados com a qualidade vida no ambiente urbano. Essas empresas também poderão ter a capacidade de adaptar-se rapidamente às mudanças nas demandas do mercado e sazonalidades, garantindo que a capacidade de entrega esteja alinhada com as necessidades dos clientes.

Por meio do uso do DISRUPSIM, as empresas podem testar a implantação de outras iniciativas de *City logistics*, como entregas noturnas, veículos elétricos e consolidação de cargas. Isso auxilia as transportadoras a entender o impacto potencial dessas medidas antes de implementá-las. Ao testar diferentes medidas e estratégias, as empresas podem identificar oportunidades para reduzir custos, como economia de combustível por pedido entregue, metro

cúbico transportado e quilômetro rodado. A ferramenta também permite que as empresas avaliem o impacto ambiental de suas operações e identifiquem maneiras de reduzir as emissões de carbono, alinhando-se com as metas de sustentabilidade.

No ambiente altamente competitivo do *e-commerce*, onde a logística eficiente desempenha um papel vital, ferramentas baseadas em modelagem e simulação, como o DISRUPSIM, permitem que as empresas permaneçam ágeis e inovadoras. Elas capacitam as empresas a tomar decisões fundamentadas, a adaptarem-se às mudanças repentinas e a atender às crescentes expectativas dos consumidores. Como resultado, a aplicação contínua dessa ferramenta pode auxiliar nas práticas adotadas para o sucesso do transporte urbano de cargas do *e-commerce* e permitir a tomada de decisão em tempo real. Essa abordagem permite que as empresas otimizem suas operações e garantam que o transporte de cargas na cidade seja eficiente, econômico e sustentável durante eventos disruptivos. Isso não só beneficia as transportadoras, mas também a qualidade de vida nas áreas urbanas, reduzindo o congestionamento e as emissões de poluentes.

Contudo, ao se implementar essas iniciativas para o contexto brasileiro, questões de segurança, infraestrutura e investimento orçamentário devem ser consideradas. O sucesso desta solução depende, entre outros aspectos: das lojas do *e-commerce* oferecerem, conscientizarem e promoverem em seus websites a adoção dessas iniciativas para seus clientes. Da concessão de benefícios para aumentar a adesão dos clientes a estas soluções e do repasse dos ganhos obtidos nas operações de entrega para reduzir os custos de entrega dos clientes, por parte das transportadoras. Ao repassar parte dos ganhos obtidos na operação com o uso dessas iniciativas para a redução dos custos de entrega dos clientes, as transportadoras podem incentivar a adesão dos clientes por meio de estratégias de precificação, como desconto no frete ou o frete grátis, por exemplo. Essa abordagem pode induzir a mudança do comportamento dos clientes para práticas mais sustentáveis, e auxiliar no gerenciamento da demanda de entregas. Incentivos à implantação de tais iniciativas também poderiam fazer parte de políticas públicas de mobilidade urbana, já que a sua utilização reduziria os efeitos negativos do transporte urbano de cargas do comércio eletrônico.

Por fim, como demonstrado nos resultados, o DISRUPSIM representa uma alternativa promissora para reduzir os problemas e promover a resiliência das operações de transporte durante eventos disruptivos, pois quando estrategicamente utilizado, auxilia no planejamento das operações de transporte. Com a expansão do comércio eletrônico durante esses eventos, a logística urbana torna-se um grande desafio, pois além de ocorrer um aumento substancial no número de entregas, são necessárias grandes transformações nos processos logísticos ao longo

da cadeia de suprimentos para o atendimento da demanda. A utilização desta ferramenta em conjunto com iniciativas de *City logistics*, pode amenizar ainda mais os impactos gerados nas operações. Neste sentido, buscar ferramentas que auxiliem no apoio a decisão durante essas situações é uma questão vital para o bom desempenho das operações das transportadoras.

6.1 Limitações e sugestões para trabalhos futuros

Essa seção final apresenta as limitações da pesquisa que podem ser exploradas em estudos futuros. O objetivo é fornecer sugestões para que os resultados encontrados nessa tese possam ser aprimorados. Como discutido anteriormente, a simulação foi realizada para uma transportadora de São João Del Rei- MG. Mesmo que os resultados encontrados possam ser generalizados para utilização posterior do modelo em outra região, é recomendável que seja realizada uma nova coleta de dados para representar as características e especificações de outras transportadoras do *e-commerce*, bem como para garantir a usabilidade para outros usuários. Isso garantirá a validade dos resultados e possibilitará a obtenção de conclusões mais alinhadas com a realidade de outras transportadoras.

Recomenda-se considerar os tempos de operação de entrega e de carga e descarga, para avaliar se o aumento do número de pedidos teria implicações para as transportadoras na forma de custos de horas extras e de tempo, por exemplo. Investigar esses tempos, pode fornecer informações sobre os custos adicionais que as transportadoras podem enfrentar devido ao aumento do número de pedidos durante eventos disruptivos. Compreendê-los é fundamental para uma gestão eficaz dos recursos e para garantir a viabilidade financeira das operações logísticas durante esses eventos, considerando inclusive as restrições estabelecidas durante esses períodos.

As localizações dos DLs podem ser mais bem exploradas, juntamente com suas capacidades de ocupação. Explorar esses aspectos possibilita uma otimização das entregas, pois as transportadoras podem ajustar suas rotas e estratégias de distribuição com base na disponibilidade e capacidade dos DLs, em diferentes áreas urbanas. Isso pode levar a uma redução nos tempos de entrega, custos operacionais e emissões de carbono, além de melhorar a satisfação do cliente. A investigação da variação na taxa de utilização dos DLs e dos custos totais das transportadoras também pode possibilitar uma compreensão mais completa dos benefícios e custos associados ao uso de DLs. Além disso, a adesão pelos clientes a essa iniciativa também pode ser explorada por meio de estratégias de precificação, como descontos e benefícios oferecidos ao cliente, ao fazer a opção de retirar sua mercadoria em um DL.

Expandir a pesquisa com os consumidores melhorará os resultados e melhorará algumas premissas assumidas no modelo, explorando esses aspectos comportamentais.

Ainda neste contexto, a mudança no comportamento de compra dos clientes durante a pandemia também pode ser investigada. Compreender como o comportamento do cliente muda durante o acontecimento de eventos disruptivos é fundamental para adaptar as estratégias de entrega e garantir a satisfação do cliente. Isso pode incluir ajustes nos horários de entrega, opções de entrega flexíveis e uma comunicação proativa com os clientes para garantir uma experiência de entrega positiva.

Testar outras iniciativas de *City Logistics* além dos DLs também pode fornecer informações valiosas sobre diferentes estratégias que as transportadoras podem adotar para otimizar suas operações de entrega. Isso pode incluir o uso de veículos elétricos, drones, bicicletas de cargas, armazenamento compartilhado e outras práticas sustentáveis. Compreender o potencial dessas iniciativas pode ajudar as transportadoras a desenvolver estratégias mais abrangentes e eficazes para lidar com os desafios logísticos contemporâneos e promover a sustentabilidade em suas operações. A análise de viabilidade econômica dessas iniciativas também pode ser explorada, para seleção de iniciativas a serem implantadas de modo a verificar se o investimento realizado compensaria os custos, aumentando a receita das operações de transporte. Outras pesquisa também poderiam incluir algumas análises utilizando heurísticas de roteamento mais robustas. Foi demonstrado que os custos de eficiência energética são melhores em cenários de alta demanda e conjunto com essas iniciativas, melhoram a sustentabilidade das operações. Esse efeito também poderia ser mais explorado.

Por fim, destaca-se que essas limitações não invalidam o ganho alcançado com esse trabalho, uma vez que este alcançou com sucesso o objetivo de desenvolver uma ferramenta de apoio à decisão baseada em Simulação Híbrida para o transporte urbano de cargas do *e-commerce* durante eventos disruptivos.

REFERÊNCIAS

- ABHILASHANI, G. L.; RANATHUNGA, M. I. D.; WIJAYANAYAKE, A. N. Minimising Last-Mile Delivery Cost and Vehicle Usage Through an Optimised Delivery Network Considering Customer-Preferred Time Windows. **International Research Conference on Smart Computing and Systems Engineering (SCSE)**, Kelaniya, Sri Lanka, 2023, pp. 1-7, doi: 10.1109/SCSE59836.2023.10215012.
- ABUALOLA, H.; MIZOUNI, R.; OTROK, H.; SINGH, S.; BARADA, H. A matching game-based crowdsourcing framework for last-mile delivery: Ground-vehicles and Unmanned-Aerial Vehicles. **Journal of Network and Computer Applications**, 2023, 213, 103601. ISSN 1084-8045.
- ABUDUREHEMAN, A.; NILUPAER, A. Optimization model design of cross-border e-commerce transportation path under the background of prevention and control of COVID-19 pneumonia. **Soft Computing**, 2021.
- AKTAS, E.; BOURLAKIS, M.; ZISSIS, D. Collaboration in the last mile: evidence from grocery deliveries. **International Journal of Logistics Research and Applications**, 2020.
- ALHO, A. R.; SILVA, J. DE A. Modeling retail establishments' freight trip generation: a comparison of methodologies to predict total weekly deliveries. **Transportation**, v. 44, p. 1195–1212, 2017.
- ALTAY, N.; GUNASEKARAN, A.; DUBEY, R.; CHILDE, S. J. Agility and resilience as antecedents of supply chain performance under moderating effects of organizational culture within the humanitarian setting: a dynamic capability view. **Production Planning & Control**, 29:14, 1158-1174, 2018.
- ALVES, R.; LIMA, R S.; SENA, D. C.; PINHO, A. F.; HOLGUÍN-VERAS, J. Agent-Based Simulation Model for Evaluating Urban Freight Policy to E-Commerce. **Sustainability**, v. 11, n. 15, p. 4020, 25 Jul. 2019.
- ALVES, R.; LIMA, R.D.S.; DE OLIVEIRA, L.K.; PINHO A. F. Conceptual Framework for Evaluating E-Commerce Deliveries Using Agent-Based Modelling and Sensitivity Analysis. **Sustainability**, 14, 15505, 2022.
- ALVES, R.; PEREIRA, C. A.; LIMA, R.S. Operational cost analysis for e-commerce deliveries using agent-based modeling and simulation. **Research in Transportation Economics**, volume 101, 2023,101348, ISSN 0739-8859.
- ANDERSON, S.; ALLEN, J.; BROWNE, M. Urban logistics—how can it meet policy makers' sustainability objectives? **Journal of Transport Geography**, v. 13, n. 1, p. 71–81, mar. 2005.
- ANPARASAN, A. A.; LEJEUNE, M. A. Data laboratory for supply chain response models during epidemic outbreaks. **Annals of Operations Research**, volume 270, 53–64, 2018.
- ARNAOUT, G. M.; ARNAOUT, J.-P. Exploring the effects of cooperative adaptive cruise control on highway traffic flow using microscopic traffic simulation. **Transportation Planning and Technology**, v. 37, n. 2, p. 186–199, fev. 2014.
- ARNOLD, F.; CARDENAS, I.; SÖRENSEN, K.; DEWULF, W. Simulation of B2C e-commerce distribution in Antwerp using cargo bikes and delivery points. **European Transport Research Review**, v. 10, n. 1, 2018.

ARORA, N.; CHARM, T.; GRIMMELT, A.; ORTEGA, M.; ROBINSON, K.; SEXAUER, C.; STAACK, Y.; WHITEHEAD, S.; YAMAKAWA, N. A global view of how consumer behavior is changing amid COVID-19. **McKinsey & Company**, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE COMÉRCIO ELETRÔNICO (ABCOMM). Com pandemia, comércio eletrônico tem salto em 2020 e dobra participação no varejo brasileiro. **Disponível em:** <<https://g1.globo.com/economia/noticia/2021/02/26/com-pandemia-comercio-eletronico-tem-salto-em-2020-e-dobra-participacao-no-varejo-brasileiro.ghtml>>. Acesso em: 19 mar. 2021.

BAE K. H.; MUSTAFEE, N.; LAZAROVA-MOLNAR, S.; ZHENG, L. Hybrid modeling of collaborative freight transportation planning using agent-based simulation, auction-based mechanisms, and optimization. **Simulation**, 98(9):753-771, 2022.

BALLANO, A.; AL-RAHAMNEH, A.; SERRANO-HERNANDEZ, A.; FAULINA, J. Agent-based modelling and simulation for hub and electric last mile distribution in Vienna. **Procedia Computer Science**, 2023, 220, 718-723.

BANKS, J.; CARSON J.S.; NELSON B. L.; NICOL, D. **Discrete-Event System Simulation**. 5 ed. ed. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 2010.

BARONE, V., CROCCO, F., & MONGELLI, D. W. E. Models of choice between shopping and E-shopping. **Applied Mechanics and Materials**, 442, 607–616, 2014.

BATTY, M. Unpredictability. EPB: Urban Analytics and City Science, 2020, vol. 47(5) 739–744.

BEAN W. L.; CILLIERS, E. The Impact of E-commerce Delivery Alternatives on Urban Freight Movements and Cost: A Carrier Perspective. **IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)**, Kuala Lumpur, Malaysia, 2022.

BULDEO RAI, H.; TOUAMI, S.; DABLANC, L. Autonomous e-commerce delivery in ordinary and exceptional circumstances. The French case. **Research in Transportation Business & Management**, Volume 45, Part A, 2022.

BENJELLOUN, A.; CRAINIC, T. G. Trends, challenges, and perspectives in city logistics. **Proceedings of the Transportation and Land Use Interaction Conference**, n. 4, p. 269–284, 2009.

BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations and Production Management**, v. 22, n. 2, p. 241–264, 2002.

BRASILEIRO, L. A.; CHIUFFA, V. P. D. Simulation of the optimal location for a distribution center of E-commerce operations in São Paulo State. **IEEE Latin America Transactions**, v. 16, n. 6, p. 1795–1800, 1 jun. 2018.

BRITO, F. O. Aplicação da simulação híbrida em um ambiente logístico. 2018.

BROWNE, J. R.; GUIFFRIDA, A. L. Carbon emissions comparison of last mile delivery versus customer pickup. **International Journal of Logistics Research and Applications**, v. 17, n. 6, p. 503–521, 2014.

- BSI, 2014. Impacto na Cadeia de Suprimentos do Surto de Ebola em 2014. https://www.bsigroup.com/LocalFiles/en-GB/supply-chain-solutions/resources/Whitepaper%20Ebola_10.14_7.pdf, acessado em 11 de março de 2020.
- CALABRÒ, G.; LE PIRA, M. GIUFFRIDA, N.; FAZIO, M.; INTURRI, G.; IGNACCOLO, M. Modelling the dynamics of fragmented vs. consolidated last-mile e-commerce deliveries via an agent-based model. **Transportation Research Procedia**, volume 62, 2022.
- CALABRÒ, G.; LE PIRA, M. GIUFFRIDA, N.; FAZIO, M.; INTURRI, G.; IGNACCOLO, M. A spatial agent-based model of e-commerce last-mile logistics towards a delivery-oriented development. **Transportation Research Interdisciplinary Perspectives**, Volume 21, 2023.
- CALNAN, M. GADSBY, E. W.; KONDE, M. K.; DIALLO, A.; ROSSMAN, J. S. The Response to and Impact of the Ebola Epidemic: Towards an Agenda for Interdisciplinary Research. **International journal of health policy and management**, 7(5), 402–411, 2018.
- CARDENAS, I. BECKERS, J.; VANELSLANDER, T.; VERHETSEL, A.; DEWULF, W. Spatial characteristics of failed and successful E-commerce deliveries in Belgian cities. **ILS 2016, 6th International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain**, p. 1–10, 2016.
- CECCATO, R.; GASTALDI, M. Last mile distribution using cargo bikes: a simulation study in Padova. **European Transport**, 2023.
- CHUNG, C. A. **Simulation Modeling Handbook**. New York: CRC Press: CRC press, 2003.
- CHWIF, L.; MEDINA, A. C. **Modelagem e Simulação a Eventos Discretos: Teoria e Aplicações**. 4a ed. São Paulo: Elsevier Brasil, 2014.
- CLAY, K., LEWIS, J., & SEVERNINI, E. Poluição, doenças infecciosas e mortalidade: evidências da pandemia de gripe espanhola de 1918. **Journal of Economic History**, 2018, 78 (4), 1179–1209. <https://doi.org/10.1017/S002205071800058X>.
- CLEOPHAS, C.; EHMKE, J. F. When are deliveries profitable - Considerando o valor do pedido e a capacidade de transporte no atendimento da demanda para entregas de última milha em áreas metropolitanas. **Business & Information Systems Engineering**: Vol. 6: Iss. 3, 153-163, 2014.
- CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – www.cetesb.sp.gov.br acessado em março de 2022.
- CRAINIC, T. G.; SGALAMBRO, A. Service network design models for two-tier city logistics. **Optimization Letters**, v. 8, n. 4, p. 1375–1387, 18 abr. 2014..
- CUNHA, B.; LETTIERI, C.; CADENA, G.; PEREIRA, V. Analyzing the Influence of COVID-19 on the E-Commerce Customer's Retail Experience in the Supermarket Industry: Insights from Brazil. **Logistics**, 2023.
- CZERNIAK, R. J.; LAHSENE, J. S.; CHATTERJEE, A. Urban Freight Movement What Form Will It Take? Committee on Urban Goods Movement. **Transportation Research Board**, 2000.
- DABLANC, L.; BEZIAT, A. Parking for freight vehicles in dense urban centers - The issue of delivery areas in Paris Principal Investigator **Researcher**. n. July, p. 1–16, 2015.

DE LA TORRE, R.; CORLU, C. G.; FAULIN, J.; ONGGO, B. S.NJUANA. A. Simulation, Optimization, and Machine Learning in Sustainable Transportation Systems: Models and Applications. **Sustainability** 2021, Vol. 13, Page 1551, v. 13, n. 3, p. 1551, 2 fev. 2021.

DIFRANCESCO, R. M.; VAN SCHILT, I. M.; WINKENBACH, M. Optimal in-store fulfillment policies for online orders in an omni-channel retail environment. *European Journal of Operational Research*, 293(3), 1058–1076, 2021.

DOBROSELSKYI, M.; MADLENÁK, R.; LAITKEP, D. Analysis of return logistics in e-commerce companies on the example of the Slovak Republic. **Transportation Research Procedia**, v. 55, n. 2019, p. 318–325, 2021

DOLGUI, A.; IVANOV, D.; ROZHKOVA, M. Does the ripple effect influence the bullwhip effect? An integrated analysis of structural and operational dynamics in the supply chain, **International Journal of Production Research**, 2020.

DOMÍNGUEZ, E.; PÉREZ, B.; RUBIO, Á.L.; ZAPATA, M.A. A taxonomy for key performance indicators management. **Computer Standards & Interfaces**, Vol. 64, pp. 24–40.2019.

DUTRA, N. G. S. O enfoque de “City Logistics” na distribuição urbana de encomendas. **Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina**, 2004.

EBIT. E-commerce brasileiro deve crescer 26% em 2021, prevê Ebit|Nielsen. **Disponível em:** <<https://canaltech.com.br/e-commerce/e-commerce-brasil-deve-crescer-26-em-2021-preve-ebit-nielsen-176430/>>. Acesso em: 19 mar. 2021.

ENAP. Escola Nacional de Administração Pública, 2021.

ERIC, K.H. LEUNG, Z. O. HUANG, G. Q. Community logistics: a dynamic strategy for facilitating immediate parcel delivery to smart lockers, **International Journal of Production Research**, 2023, 61:9, 2937-2962.

FARIA, B. DE C. Localização de Delivery Lockers para logística urbana em uma cidade brasileira de porte médio: O caso de Divinópolis, Minas Gerais. **Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção**. Universidade Federal de Itajubá, 2021.

FARIAS, H. S. O avanço da Covid-19 e o isolamento social como estratégia para redução da vulnerabilidade. **Espaço e Economia**, n. 17, 7 abr. 2020.

FU, M.; XIA, W.; WANG, L. Optimization of parcels picking and delivery in a large e-commerce company using target-guided ant colony algorithm. *Boletim Técnico/Technical Bulletin*, 2017, 55, 16-25.

GHADERI, H.; TSAI, P. W.; ZHANG, L.; MOAYEDIKIA, A. An integrated crowdshipping framework for green last mile delivery. *Sustainable Cities and Society*, 78, 103552, 2022.

GEE, I.; DAVIDSON, T.; SPEETLES, B.; WEBBER, M. Deliver Me from food waste: Model framework for comparing the energy use of meal-kit delivery and groceries. **Journal of Cleaner Production**, 2019

GILSING, R.; WILBIK, A.; GREFFEN, P.; TURETKEN, O.; OZKAN, B.; ADALI, O. E.; BERKERS, F. Defining business model key performance indicators using intentional linguistic summaries. **Software and Systems Modeling**, Vol. 20, pp. 965–996, 2021.

GIUSTI R.; MANERBA D.; PERBOLI G.; TADEI R.; YUAN S. A New Open-source System for Strategic Freight Logistics Planning: the SYNCHRO-NET Optimization Tools. **Transportation Research Procedia**, vol. 30, pp. 245-254, 2018.

GONZÁLEZ-VARONA, J. M.; VILLAFÁÑEZ, F. ACEBES, F. REDONDO, A.; POZA, D. Reusing newspaper kiosks for last-mile delivery in urban areas. **Sustainability** (Switzerland), v. 12, n. 22, p. 1–27, 2020.

GUTIERREZ-FRANCO, E., MEJIA-ARGUETA, C. AND L. RABELO. Data-Driven Methodology to Support Long-Lasting Logistics and Decision Making for Urban Last-Mile Operations. **Sustainability**, 13, 6230, 2021.

GOVINDAN, K., MINA, H., & ALAVI, B. A decision support system for demand management in healthcare supply chains considering the epidemic outbreaks: A case study of coronavirus disease 2019 (COVID-19). **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, volume 138, 101967, ISSN 1366-5545, 2020.

GUO, X.; JARAMILLO, Y. J. L.; BLOEMHOF-RUWAARD, J; CLAASSEN, G.D.H. On integrating crowdsourced delivery in last-mile logistics: A simulation study to quantify its feasibility. **Journal of Cleaner Production**, v. 241, 2019.

GUTIERREZ-FRANCO, E.; MEJIA-ARGUETA, C.; RABELO, L. Data-Driven Methodology to Support Long-Lasting Logistics and Decision Making for Urban Last-Mile Operations. **Sustainability**, 13, 6230, 2021.

HERCULANO, R. D.; NORBERTO, A. M. Q. Análise da produtividade científica dos docentes da Universidade Estadual Paulista, campus de Marília/SP. **Perspectivas em Ciência da Informação**, v. 17, n. 2, p. 57–70, 2012.

HESHMATI, S. VERSTICHEL, J. ESPRIT, E. e VANDEN B. G. Alternative e-commerce delivery policies: A case study concerning the effects on carbon emissions. **EURO Journal on Transportation and Logistics**. 2018

HOLGUÍN-VERAS, J. *et al.* NCFRP REPORT 33 Improving Freight System Performance in Metropolitan Areas: A Planning Guide. Transportation Research Board. Anais...Washington, D.C.: 22 abr. 2015. **Disponível em:** <<https://www.nap.edu/catalog/22159>>. Acesso em: 13 dez. 2021.

HOLGUÍN-VERAS, J.; WANG, X.; KIM, W. SCHMID, J. Adoption of delivery services in light of the COVID pandemic: Who and how long? **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, volume 154, December, Pages 270-286, 2021.

HOLGUÍN-VERAS, J.; ENCARNACIÓN, T.; PÉREZ-GUZMÁN, S.; CANTILLO, V.; CALDERÓN, O. The role and potential of trusted change agents and freight demand management in mitigating “Panic Buying” shortages. **Transportation Research Interdisciplinary Perspectives**, volume 19, 2023.

HORI, S. KOMODA. N. OHKAWA, T. Drone airfield location determination method for parcel delivery by vehicle and drone.I **International Symposium on System Integration (SII)**, Atlanta, GA, USA, 2023, pp. 1-6.

IBGE. Indicadores de Desenvolvimento Sustentável, 2015.

INOUE, Y.; HASHIMOTO, M.; TAKENAKA, T. Effectiveness of Ecosystem Strategies for the Sustainability of Marketplace Platform Ecosystems. **Sustainability** 2019

IVANOV, D. Supply chain simulation and optimization with anyLogistix. 5th, updated edition, 2021. **Berlin School of Economics and Law**. In: <https://www.anylogistix.com/resources/books/alx-textbook/>

IVANOV, D. Predicting the impacts of epidemic outbreaks on global supply chains: A simulation-based analysis on the coronavirus outbreak (COVID-19/SARS-CoV-2) case. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 136, 1 abr. 2020.

IWAN, S.; KIJEWSKA, K.; LEMKE, J. Analysis of parcel lockers ' efficiency as the last mile delivery solution – the results of the research in Poland. **The 9th International Conference on City Logistics**, Tenerife, Canary Islands (Spain), n. June 2015, p. 644–655, 2016.

JALLER, M.; XIAO, R.; DENNIS-BAUER, S.; RIVERA-ROYERO, D.; PAHWA, A. Estimating last-mile deliveries and shopping travel emissions by 2050. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, volume 123, 2023,

KEDIA, A.; KUSUMASTUTI, D.; NICHOLSON, A. Acceptability of collection and delivery points from consumers' perspective: A qualitative case study of Christchurch city. **Case Studies on Transport Policy**, v. 5, n. 4, p. 587–595, 1 dez. 2017.

KELTON, W. D.; LAW, A. M. **Simulation modeling and analysis**. McGraw Hill Boston, 2000.

KHALID, R.; CHANKOV, S. M. Drone Delivery Using Public Transport: An Agent-Based Modelling and Simulation Approach. In: **Lecture Notes in Logistics**. Springer Science and Business Media B.V., p. 374–383, 2020.

KIM, S.; SON, Y.; TIAN, Y.; CHIU, Y.; YANG, C. Y. D. Cognition-based hierarchical en route planning for multi-agent traffic simulation. **Expert Systems with Applications**, v. 85, p. 335–347, 1 nov. 2017.

KIOUSIS, V.; NATHANAIL, E; KARAKIKES. I. Assessing traffic and environmental impacts of smart lockers logistics measure in a medium-sized municipality of Athens. **Advances in Intelligent Systems and Computing**, 2019.

KLEIJNEN, J. P. C.; SANCHEZ, S. M.; LUCAS, T. W.; CIOPPA, T. M. State-of-the-Art Review A User ' s Guide to the Brave New World of Designing Simulation Experiments. **INFORMS Journal on Computing**, v. 17, n. 3, p. 263–289, 2005.

KNOBLOCH, F.; BRAUNSCHWEIG, N. A Traffic-Aware Moving Light System Featuring Optimal Energy Efficiency. **IEEE Sensors Journal**, v. 17, n. 23, p. 7731–7740, 2017.

KOCH, S., & KLEIN, R. Route-based approximate dynamic programming for dynamic pricing in attended home delivery. **European Journal of Operational Research**, 2020.

KUSUMA, P. D. Motorcycle Taxi-Minibus collaborative model in local courier service. **Journal of Engineering and Applied Sciences**. 13. 4518-4524, 2018.

KUSUMA, P. D.; KALLISTA, M. Pickup and delivery problem in the collaborative city courier service by using genetic algorithm and nearest distance. **Bulletin of Electrical Engineering and Informatics**, vol. 11, No. 2, 2022,

LABEGALINI, A. Modelos De Geração De Viagens E Demanda Por Vagas De Estacionamento Para Transporte Urbano De Cargas em Cidades De Médio Porte: O Caso De Itajubá-MG. **Dissertações (Mestrado em Engenharia de Produção)** Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2020. <https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/2299>

LAMBERT, L. 75% das empresas relatam que o coronavírus interrompeu suas cadeias de suprimentos, **Fortune**, visualizado em 30 de agosto de 2020, <https://fortune.com/2020/03/11/75-of-companies-report-coronavirus-has-disrupted-their-supply-correntes/>.

LANG, S. REGGELIN, T. & MANNER-ROMBERG, H. Forecast Models and Hierarchical Combined Discrete-Rate/Discrete-Event Simulation Models for Parcel Service Networks. **Proceedings of the Int. Conf. on Harbor Maritime and Multimodal Logistics M&S**, 2017.

LEAL, F. *et al.* Desenvolvimento E Aplicação De Uma Técnica De Modelagem Conceitual De Processos Em Projetos De Simulação: O IDEF- SIM. **XXIX Encontro Nacional De Engenharia De Produção**. Anais...Salvador-BA: 2009. Disponível em: <<http://www.fabiano.unifei.edu.br/Downloads/Publicacoes/IDEF%20SIM%20enegep%202009.pdf>>. Acesso em: 26 set. 2017

LEE, S.; HONG, D.; KIM, J.; BAEK, D.; CHANG, N. Congestion-Aware Multi-Drone Delivery Routing Framework. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, vol. 71, no. 9, pp. 9384-9396, 2022

LESSA, D. A. Análise Da Dinâmica Da Distribuição Urbana De Mercadorias Ante Uma Situação De Vulnerabilidade: Explorando Uma Abordagem Multiagente. **Dissertações**, repositório da **Universidade Federal de Minas**, Belo Horizonte, 2015. <http://hdl.handle.net/1843/BUOS-A44G5X>

LI, Y.; ZOBEL, C. W. Exploring supply chain network resilience in the presence of the ripple effect. **International journal of production economics**, 228, 107693, 2020.

LIU, L.; HWANG, T.; LEE, S., OUYANG, Y.; LEE, B., SMITH, S. J.; TESSUM, C. W.; MARSHALL, J. D.; YAN, F.; DAENZER, K.; BOND, T. C. Health and climate impacts of future United States land freight modelled with global-to-urban models. **Nature Sustainability**, 2(2), 105–112, 2019.

LOPES, H. DOS S. Análise do Escoamento da Soja brasileira através da Simulação a Eventos Discretos. 2017. 172 f. **Tese (Doutorado em Engenharia de Produção)** – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2017.

MACAL, C. M. Everything you need to know about agent-based modelling and simulation. **Journal of Simulation**, v. 10, n. 2, p. 144–156, 2016.

MARCUCCI, E.; GATTA, V.; LE PIRA, M.; CHAO, T.; LI, S. Bricks or clicks? Consumer channel choice and its transport and environmental implications for the grocery market in Norway. **Cities**, volume 110, 103046, ISSN 0264-2751, 2021.

- MAVI, R. K.; MAVI, N. K.; OLARU, D.; BIERMANN, S.; CHI, S. Innovations in freight transport: a systematic literature evaluation and COVID implications. **The International Journal of Logistics Management**, Vol. 33 No. 4, pp. 1157-1195, 2022.
- MELKONYAN, A.; GRUCHMANN, T.; LOHMAR, F.; KAMATH, V.; SPINLER, S. Sustainability assessment of last-mile logistics and distribution strategies: The case of local food networks. **International Journal of Production Economics** 228(2):107746, 2020.
- MELLO, C. H. P.; MARTINS, R. A.; TURRIONI, J. B. **Guia Para Elaboração de Monografia e Tcc Em Engenharia de Produção**. 1a ed. Atlas, 2013.
- MERKERT, R.; BLIEMER, M.C.J.; FAYYAZ, M. Consumer preferences for innovative and traditional last-mile parcel delivery. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, Vol. 52 No. 3, pp. 261-284, 2022.
- MIGUEL, P. A. C.; MORABITO, R.; PUREZA, V. **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. Rio de Janeiro: Elsevier Brasil, 2009.
- MILER, R.K.; KURIATA, A.; BRZOZOWSKA, A.; AKOEL, A.; KALINICHENKO, A.. The Algorithm of a Game-Based System in the Relation between an Operator and a Technical Object in Management of E-Commerce Logistics Processes with the Use of Machine Learning. **Sensors**, 21, 5244, 2021.
- MILEWSKI, D.; MILEWSKA, B. The Energy Efficiency of the Last Mile in the E-Commerce Distribution in the Context the COVID-19 Pandemic. **Energies**, Vol. 14, Page 7863, v. 14, n. 23, p. 7863, 2021.
- MIRANDA, R. DE C. Algoritmo genético adaptativo para otimização de modelos de Simulação a Eventos Discreto. 2012. 149 p. **Dissertação (Mestrado)** - Engenharia de Produção, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2012
- MOLAEINASAB, S.; DAHIMI, A.; SAMIMI, A. An agent based simulation to analyze trucking sector regulation policies. **Transportation Letters**, 2022.
- MONTEMARI, M.; AND GATTI, M.B Building Resilient and Innovative Business Models in the Era of Covid-19: A Process Approach. **Journal of Business Models**, Vol. 10 No. 1, pp. 67–77, 2019.
- MONTEMURRO, N. The emotional impact of COVID-19: From medical staff to common people. **Brain, Behavior, and Immunity**, v. 87, p. 23–24, 1 jul. 2020.
- MONTEVECHI, J. A. B.; LEAL, F.; DE PINHO, A. F.; DA SILVA COSTA, R. F.; DE OLIVEIRA, M. L. M.; DA SILVA, A. L. F. Conceptual modeling in simulation projects 136 by mean adapted IDEF: An application in a Brazilian tech company. **Proceedings - Winter Simulation Conference**, n. June 2014, p. 1624–1635, 2010.
- MONTEVECHI, J. A. B.; MIRANDA, R. DE C.; FRIEND, J. D. Sensitivity Analysis in Discrete-Event Simulation Using Design of Experiments. In: LIM, E. W. C. (Org.). **Discrete Event Simulations - Development and Applications**, n. 1ed.Croácia: INTECH, p. 63–102, 2012.
- MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. New York: New York: mJohn Wiley & Sons, Inc., 2005.

MORGANTI, E.; GONZALEZ-FELIU, J. City logistics for perishable products. The case of the Parma's Food Hub. **Case Studies on Transport Policy**, v. 3, n. 2, p. 120–128, 2015.

MUKESH, K.; GUPTA, M. P.; KHAITAN, A. Multiobjective fuzzy vehicle routing using Twitter data: Reimagining the delivery of essential goods. **International Journal of Intelligent Systems**, 2021.

MUÑOZ-VILLAMIZAR, A.; Velázquez-Martínez. J. C; Haro, P.; Ferrer, A.; Mariño, R. The environmental impact of fast shipping ecommerce in inbound logistics operations: A case study in Mexico. **Journal of Cleaner Production**, v. 283, 2021.

NAHRY, N.; AYU, T. Green last mile distribution system: Heterogeneous fleet vehicle routing problem with time window and external cost. **Journal of Applied Engineering Science**, 19. 1-8, 2021.

NGUYEN, Q. T.; PATRICK, J.; OULMAKKI, O.; RAMIREZ-RIOS, D. G.; VERNY, J. Last mile delivery of grocery bins in Paris: costs from routing strategies with autonomous delivery vehicles. **International Journal of Integrated Supply Management** 2023 16:3, 207-228

NOGUEIRA, G. P. M.; RANGEL, J. J. A.; CROCE, P. R.; PEIXOTO, T. A. The environmental impact of fast delivery B2C e-commerce in outbound logistics operations: A simulation approach. **Cleaner Logistics and Supply Chain**, Volume 5, 2022.

NUZZOLO, A.; COMI, A. Urban freight demand forecasting: A mixed quantity/delivery/vehicle-based model. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 65, p. 84–98, 2014.

OLIVEIRA, G. F. DE; OLIVEIRA, L. K. DE. Stakeholder's Perceptions of City Logistics: An Exploratory Study in Brazil. *Transportation Research Procedia*, v. 12, p. 339–347, 2016.

OLIVEIRA, L. C. Fatores de influência para utilização de sistema de entregas via lockers – armários inteligentes. **Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, 2021.

OLIVEIRA, L. K. DE; LESSA, D. A., OLIVEIRA, E., & CALAZANS, B. F. G. Multi-agent modelling approach for evaluating the city logistics dynamic in a vulnerability situation: An exploratory study in Belo Horizonte (Brazil). **Transportation Research Procedia**, v. 25, p. 1046–1060, 2017.

OLIVEIRA, L. K. D. E.; MATOS, B. A.; DABLANC, L.; RIBEIRO, K.; ISA, S. S. Distribuição Urbana de Mercadorias e Planos de Mobilidade de Carga: Oportunidades para municípios brasileiros Distribuição Urbana de Mercadorias e Planos de Mobilidade de Carga Oportunidades para municípios brasileiros. InterAmerican Development Bank. 2018.

OLIVEIRA, L.K.; DE OLIVEIRA, R.L.M.; SOUSA, L.T.M.; CALIARI, I.P.; NASCIMENTO, C.D.L. Analysis of accessibility from collection and delivery points: Towards the sustainability of the e-commerce delivery. *Urbe*. **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, 2019.

ONU. ONU prevê que cidades abriguem 70% da população mundial até 2050 | ONU News. **Disponível em:** <<https://news.un.org/pt/story/2019/02/1660701>>. Acesso em: 22 jun. 2021.

ORENSTEIN, I.; RAVIV, T. Parcel delivery using the hyperconnected service network. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, Volume 161, 2022.

PAN, S.; CHEN, C.; ZHONG, R. Y. A crowdsourcing solution to collect e-commerce reverse flows in metropolitan areas. **IFAC- Papers OnLine**, 28(3), 1984–1989, 2015.

PAPADOPOULOS, A.; KORDONIS, I; DESSOUKY, M.; LOANNOU, P. Coordinated Freight Routing With Individual Incentives for Participation. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, vol. 20, no. 9, pp. 3397-3408, 2019,

PATELLA, S.M.; GRAZIESCHI, G.; GATTA, V.; MARCUCCI, E.; CARRESE, S. The Adoption of Green Vehicles in Last Mile Logistics: A Systematic Review. **Sustainability** 2020, 13, 6. PERBOLI, G. *et al.* Simulation–optimisation framework for City Logistics: an application on multimodal last-mile delivery. **IET Intelligent Transport Systems**, v. 12, n. 4, p. 262–269, 2018.

PAVLOV, A.; IVANOV, D.; WERNER, F.; DOLGUI, A; SOKOLOV. B. Integrated detection of disruption scenarios, the ripple effect dispersal and recovery paths in supply chains. **Annals of Operations Research**, 319, 609–631, 2022.

PERBOLI, G.; ROSANO, M. 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, n. November 2016, p. 19–36, 2019.

PORSSE, A. A.; Souza, K. B.; Carvalho, T. S.; Vale, V. A. Impactos Econômicos da COVID-19 no Brasil. Curitiba, 2020. **Disponível em:** <<http://www.nedur.ufpr.br/portal/wp-content/uploads/2020/04/nota-tecnica-nedur-ufpr-01-2020-impactos-economicos-da-covid-19-no-brasil.pdf>>. Acesso em: 12 jul. 2021.

RAHMAN, T. TAGHIKHAH, F.; SHUKLA, N.; AGARWAL, R. An agent-based model for supply chain recovery in the wake of the COVID-19 pandemic. **Computers and Industrial Engineering**, v. 158, 2021.

RAJESH, B.; RAJAN, J. Sustainable performance of cargo bikes to improve the delivery time using traffic simulation model. **FME Transactions**. 48. 411-418, 2020.

RAMIREZ-RIOS, D.G. *et al.* Modeling the Space Requirements of Freight and Service Activity Vehicles for Curbside Parking. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 153, p. 155-173, 2023.

RANATHUNGA, M. I. D. WIJAYANAYAKE, A. N. AND NIWUNHELLA, D. H. H. Simulation-Based Efficiency Assessment of Integrated First-Mile Pickup and Last-Mile Delivery in an E-Commerce Logistics Network. **International Research Conference on Smart Computing and Systems Engineering (SCSE)**, Colombo, Sri Lanka, 2022,

RAVIV, T.; ORENSTEIN, I.; SADAN, E. Flexible parcel delivery to automated parcel lockers: models, solution methods and analysis. **EURO Journal on Transportation and Logistics**, v. 8, n. 5, p. 683–711, 2019.

REIFFER, A.; KÜBLER, J.; BRIEM, L.; KAGERBAUER, M.; VORTISCH, P. Integrating Urban Last-Mile Package Deliveries into an Agent-Based Travel Demand Model. *Procedia Computer Science*, 184, 178–185, 2021.

REIJERS, Thayla Sara Soares Stivari. Desenvolvimento de modelo computacional híbrido - baseado em agentes e em Simulação a Eventos Discretos - para avaliação e planejamento da produção animal: uma aplicação na ovinocultura de corte. 2016. **Tese (Doutorado em Nutrição e Produção Animal) - Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia,**

Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2016. doi: 10.11606/T.10.2017.tde-05122016-115209. Acesso em: 2021-09-21.

REN, R.; HU, W.; DONG, J.; SUN, B.; CHEN, Y.; CHEN, Z. A systematic literature review of green and sustainable logistics: Bibliometric analysis, research trend and knowledge taxonomy. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, 17, 261, 2020.

RIZK, Y., & AWAD, M. A quantum genetic algorithm for pickup and delivery problems with coalition formation. **Procedia Computer Science**, 159, 261–270, 2019.

RUAN, J.; SHI, Y. Monitoring and assessing fruit freshness in IOT-based e-commerce delivery using scenario analysis and interval number approaches. **Information Sciences**, 373, 557–570, 2016.

SAKAI, T.; HARA, Y.; SESHADRI, R.; ALHO, A. R.; HASNINE, MD. S.; JING, P.; CHUA, Z.; BEN-AKIVA, M. Household-based E-commerce demand modeling for an agent-based urban transportation simulation platform, **Transportation Planning and Technology**, 45:2, 179-201, 2022.

SIRAGUSA, C.H.; TUMINO, A. E-grocery: Comparing the environmental impacts of the online and offline purchasing processes. **International Journal of Logistics Research and Applications**. 2021.

SARGENT, R. G. Verification and validation of simulation models. **Journal of Simulation**, v. 7, n. 1, p. 12–24, 2013.

SARTORELLO, Gustavo Lineu. Desenvolvimento de modelo híbrido de simulação para avaliação econômica de sistemas integrados de produção agropecuária. 2021. **Tese (Doutorado em Nutrição e Produção Animal) - Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia, Universidade de São Paulo**, Pirassununga, 2021. doi: 10.11606/T.10.2021.tde-19042021-141843. Acesso em: 2021-09-21.

SAWIK, B.; SERRANO-HERNANDEZ, A.; MURO, A.; FAULIN, J. Multi-Criteria Simulation Optimization Analysis of Usage of Automated Parcel Lockers: A Practical Approach. **Mathematics**, 2022, 10, 4423. 2022.

SENHORAS, E. M. NOVO CORONAVÍRUS E SEUS IMPACTOS ECONÔMICOS NO MUNDO. Boletim de Conjuntura (BOCA) - **Revista UFRR**, v. 1, n. 2, 10 fev. 2020.

SERRANO-HERNANDEZ, A.; DE LA TORRE, R.; CADARSO, L.; FAULIN, J. Urban e-Grocery Distribution Design in Pamplona (Spain). Applying an Agent-Based Simulation Model with Horizontal Cooperation Scenarios. **Algorithms**, 14, 20, 2021.

SHEN, J. An e-commerce facility location problem under uncertainty. **Scientia Iranica**. 28. 412-423, 2021.

SILVA, K. O. A. N. Modelos de geração de viagens para transporte urbano de mercadorias em cidades históricas: o caso de São João del Rei-MG. **Dissertações (Mestrado em Engenharia de Produção)**. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2019.

SILVA, K.; DA SILVA LIMA, R.; ALVES, R.; YUSHIMITO, W. F.; HOLGUÍN-VERAS, J. Freight and Service Parking Needs in Historical Centers: A Case Study in São João Del Rei,

Brazil. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, 2674(11), 352–366, 2020.

SILVA, K. O. A. N.; ALVES, R.; PORTELLA, N. V.; BARRA, G. M. J.; FERNANDES, Y. C. A Influência da Pandemia da Covid-19 no Sistema de Distribuição de Mercadorias do E-Commerce: Um Estudo de Casos Múltiplos. **XXXV Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte**, 2021.

SILVA, K. O. A. N.; LIMA, R. S.; ALVES, R. The Impacts of the Pandemic on Urban Freight Deliveries: a Case Study in a Brazilian Carrier. *International Journal of Simulation Modelling* Volume 23: Number 1: March 2024.

SIMONI, M. D. MARCUCCI, E., GATTA, V.; CLAUDEL, C. G. Potential last-mile impacts of crowdshipping services: a simulation-based evaluation. **Transportation**, v. 47, n. 4, p. 1933–1954, 1 ago. 2020.

SONG, G.; ZHAO, Z; TIAN, C.; YI, Y.; SONG, T. Research on Joint Distribution of Rural Logistics. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 631, 052003, 2019.

SOUSA, I. L. A.; NASCIMENTO, K.M.; ALVES, R. Influence of the Covid-19 Pandemic on Purchasing Behavior and the Perception of Shipping Price and Delivery Time by Brazilian E-shoppers. **Industrial Engineering and Operations Management**, 2022.

SOPHA, B. M.; SIAGIAN, A.; ASIH, A. M. S. Simulating Dynamic Vehicle Routing Problem Using Agent-Based Modeling and Simulation. **Ieee International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (Ieem)**; 1335-1339 2016, p. 1335–1339, 2016.

STATISTA. **Annual retail e-commerce sales growth worldwide from 2017 to 2023**. Disponível em: <<https://www.statista.com/statistics/288487/forecast-of-global-b2c-e-commerce-growth/>>. Acesso em: 19 mar. 2021

STINSON, M.; AULD, J.; MOHAMMADIAN, A. K. A large-scale, agent-based simulation of metropolitan freight movements with passenger and freight market interactions. **Procedia Computer Science**, 170, 771–778, 2020.

STRAUBINGER, A.; GROOT, H. DE L. F.; VERHOEF, E.T. E-commerce, delivery drones and their impact on cities, **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, volume 178, 2023.

SUWATCHARACHAITIWONG, S., LIN, C. C., HUANG, W., e HUNG, L. P. On the medication distribution system for home health care through convenience stores, lockers, and home delivery. **Health Informatics Journal**, 26(4), 3163–3183, 2020.

TAKO, A. A.; ROBINSON, S. The application of discrete event simulation and system dynamics in the logistics and supply chain context. **Decision Support Systems**, v. 52, n. 4, p. 802–815, mar. 2012.

TANIGUCHI, E. *et al.* **Network Modelling and Intelligent Transport System Book**. Pergamon, 2001.

TANIGUCHI, E.; THOMPSON, R. G.; YAMADA, T. Emerging Techniques for Enhancing the Practical Application of City Logistics Models. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 39, p. 3–18, 2012.

TANIGUCHI, E.; THOMPSON, R. G.; TADASHI, Y. Recent Trends and Innovations in Modelling City Logistics. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 125, p. 4–14, 20 mar. 2014.

TEO, J.; TANIGUCHI, E.; QURESHI, A. Evaluation of Distance-Based and Cordon-Based Urban Freight Road Pricing in E-Commerce Environment with Multiagent Model. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2269, n. 2269, p. 127–134, 2012.

THALLER, C.; CLAUSEN, U.; KAMPMANN, R. System Dynamics Based, Microscopic Freight Transport Simulation for Urban Areas. In: Clausen, U., Friedrich, H., Thaller, C., Geiger, C. (eds) **Commercial Transport. Lecture Notes in Logistics**. Springer, Cham, 2016.

VAN DE VEN, M.; LARA MACHADO, P.; AUGENSTEIN, D.; ATHANASOPOULOU, A.; AYSOLMAZ, B.; TÜRETKEN, O. Defining Key Performance Indicators for Business Models: Design Principles for a Method and Tool Support. **European Conference on Information Systems (ECIS), 2023: Research-in-Progress Papers AIS Electronic Library**.

VAZQUEZ-NOGUEROL, M.; COMESAÑA-BENAVIDES, J.A.; RIVEIRO-SANROMAN, S. A.; PRADO-PRADO, J. C. mixed integer linear programming model to support e-fulfillment strategies in warehouse-based supermarket chains. **Central European Journal of Operations Research**, 2021.

VIANA, M. S. Estratégias de logística urbana a serem aplicadas nas áreas centrais e históricas: proposta metodológica baseada em avaliação multicritério em ambiente SIG. **Thesis: Universidade Federal da Bahia**, 18 maio de 2016.

VIU-ROIG, M.; ALVAREZ-PALAU, E. J. The impact of E-Commerce-related last-mile logistics on cities: A systematic literature review. **Sustainability (Switzerland)**, v. 12, n. 16, 2020.

WISNIEWSKI, T. Integrated Simulation and Regression Framework for Delivery Management in E-commerce. **Problemy Zarzadzania**, University of Warsaw, Faculty of Management, vol. 82(82), pages 205-217, 2019.

WANG, X.; CAO, W. Research on optimization of distribution route for cold chain logistics cooperative distribution of fresh e-commerce based on price discount. **Journal of Physics: Conference Series**, 1732, 012041, 2021.

WANG, Y.; PENG, Z.; CHEN, Q. Model for public car park layout based on dynamic multiperiodic parking demands. **Journal of Urban Planning and Development**, v. 144, n. 4, 1 dez. 2018.

WEI, L.; KAPUSCINSKI, R.; JASIN, S. Shipping Consolidation Across Two Warehouses with Delivery Deadline and Expedited Options for E-commerce and Omni-channel Retailers. **Manufacturing & Service Operations Management**, 2020.

WU, Y., DING, Y., DING, S., SAVARIA, Y., e LI, M. (Autonomous Last-Mile Delivery Based on the Cooperation of Multiple Heterogeneous Unmanned Ground Vehicles. **Mathematical Problems in Engineering**, 2021.

XIAO, H.; QIAN, J.; TANG, X. B2C E-commerce Vehicle Delivery Model and Simulation. **Information Technology Journal**, 2013.

XU, W. X., & YANG, H. C. Urban common delivery model analysis and system design. In **Applied Mechanics and Materials**, Vol. 339, 2013.

YANG, X., & STRAUSS, A. K. An approximate dynamic programming approach to attended home delivery management. *European Journal of Operational Research*, 263(3), 935–945, 2017.

YETIS, H.; KARAKOSE, M. Collaborative Truck-Drone Routing Optimization Using Quantum-Inspired Genetic Algorithms. **25th International Conference on Information Technology (IT)**, 2021.

ZEHTABIAN, S.; LARSEN, L.; WØHLK, S. Estimation of the arrival time of deliveries by occasional drivers in a crowd-shipping setting. **European Journal of Operational Research**, volume 303, Issue 2, 2022.

ZHANG, L.; MATTEIS, T.; THALLER, C.; LIEDTKE, G. Simulation-based Assessment of Cargo Bicycle and Pick-up Point in Urban Parcel Delivery. **Procedia Computer Science**, 130, 18–25, 2018.

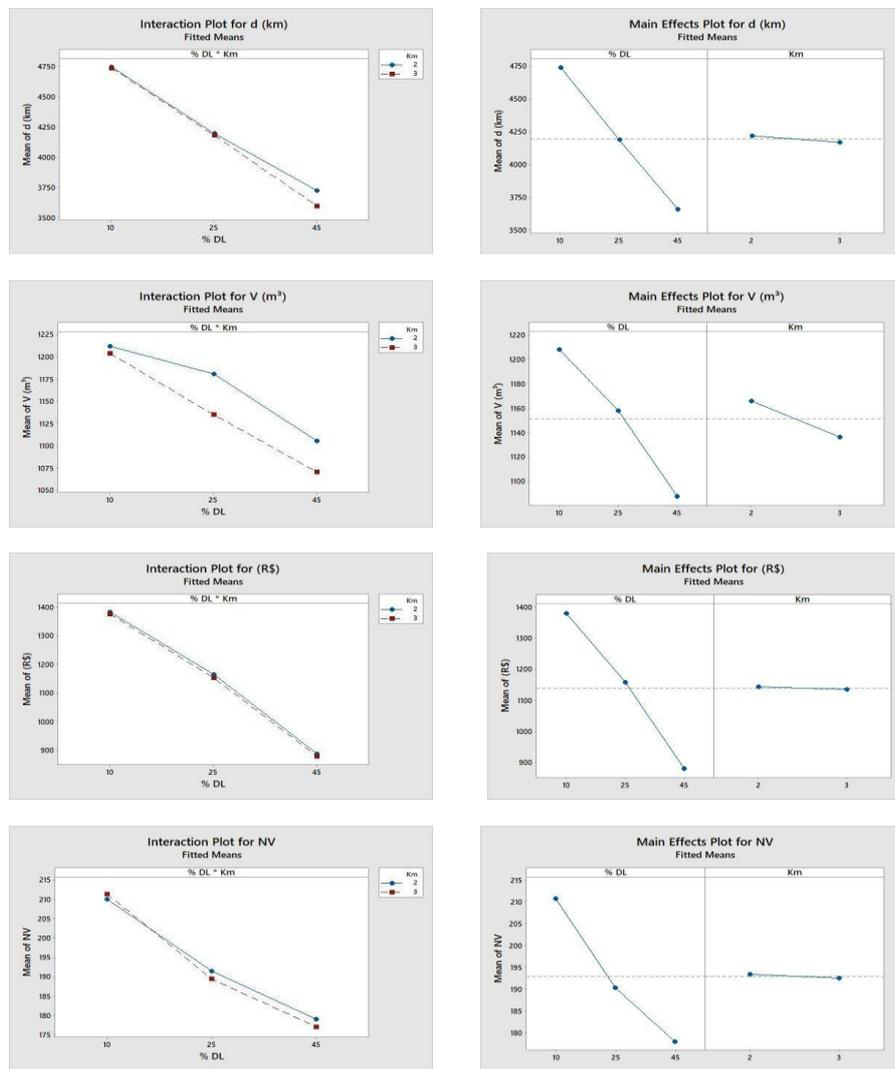
ZHANG, R. ZHANG, Z. Path planning research for mobile robots in dynamic environments. **Third International Symposium on Computer Engineering and Intelligent Communications (ISCEIC)**, 2022), 124622Y.

ZHIQIANG, N.; LI, C.; DONG, H.; ZHANG, F.; MENG, L.; TONG, L.; WU, D. Analyzing dispatching wave policies for e-commerce logistics based on the multi-agent-based simulation. **Journal of System Simulation**, 32(12): 2415-2425, 2020.

ZHU, X.; PASCH, T. J.; BERGSTROM, A. Understanding the structure of risk belief systems concerning drone delivery: A network analysis. **Technology in Society**, v. 62, 2020.

APÊNDICE A

Este apêndice apresenta uma análise detalhada dos gráficos de interação e efeitos principais. A linha de referência horizontal representa a média geral dos dados e as retas, que representam os fatores, têm por objetivo mostrar a magnitude dos efeitos. Quanto maior for a inclinação da reta, mais impacto (positivo ou negativo) o respectivo fator causará nas variáveis de resposta. Pela análise, dos gráficos pode-se observar que todos os fatores analisados interferem nas variáveis analisadas, mesmo que em menor significância na interação de segunda ordem.



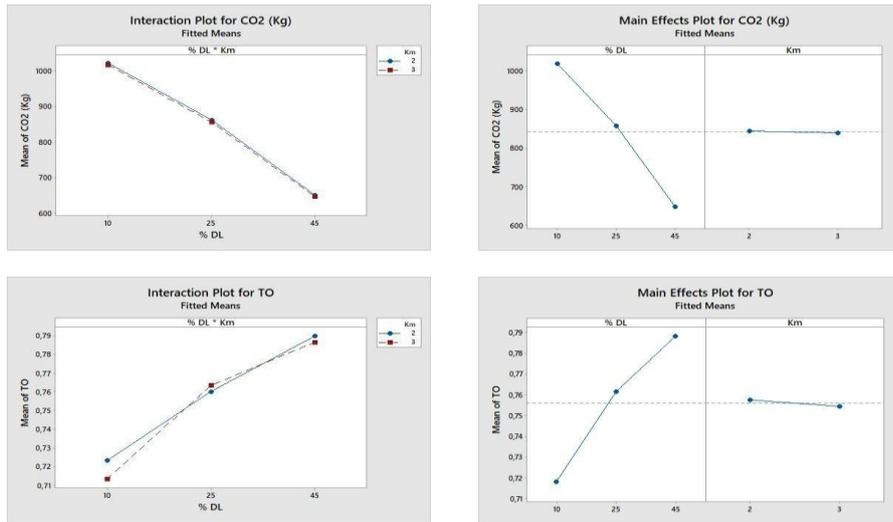


Tabela 13- Gráficos de interação e efeitos principais

APÊNDICE B

Atividades que deverão ser desenvolvidas para aplicação do DISRUPSIM com adoção de veículos autônomos, bicicletas de cargas ou drones.

1. Estabelecimento das bases do modelo
 - a) Base de dados – formalização da parceria com uma transportadora para obtenção de:
 - Definição da dimensão temporal (definição do período a ser estudado)
 - Localização do centro de distribuição da transportadora (informações geográficas)
 - Histórico de entregas realizadas (demanda dos clientes)
 - Dados sobre a frota da transportadora (número de veículos, capacidade de carga, velocidade, emissões de CO₂*, gasto médio com combustível de cada veículo)
 - Dados sobre os pedidos entregues (peso e volume)
 - Dados sobre as regiões atendidas (bairros, distritos e cidades atendidos)
 - Dados sobre o planejamento das entregas (programação e política de atendimento)
 - b) Elaboração de lógica de concepção dos cenários a serem simulados
2. Estabelecimento da base operacional do modelo
 - b) Base operacional – estruturação dos dados para modelagem e calibração do modelo com os dados obtidos em (1).
 - Lista de tabelas utilizadas no *software* para entrada dos dados (Tabela 13):
3. Definição das medidas de desempenho utilizadas no modelo:
 - Distância percorrida (km)
 - Volume transportado (m³)
 - Gasto com combustível (R\$)
 - Número de viagens
 - Emissões de CO₂ (kg)
 - Taxa de ocupação dos veículos
4. Simulação de cenários:
 - Simulação de cenários iniciais
 - Análise dos resultados
 - Definição de iniciativas de *City logistics* para novos cenários a serem simulados
 - **Realização de experimentos (geração de cenários comparativos com iniciativas de *City logistics* escolhidas, de acordo com as alterações destacadas na Tabela 11)**

5. Análise de indicadores de desempenho para os cenários simulados, com base nos resultados obtidos em “4”:

 - Custo por metro cúbico transportado
 - Custo por quilograma de CO₂
 - Custo por quilômetro rodado
 - Custo por pedido entregue

6. Realização do cálculo da eficiência energética para os cenários simulados, com base nos resultados obtidos em “4”.
- 7.

Tabela 14- Lista de tabelas utilizadas para modelagem no software

Nome da Tabela	Objetivo
<i>Costumers</i>	<i>Nomear os clientes, localização e tipologia</i>
<i>DC and Factories</i>	<i>Nomear o centro de distribuição da transportadora e outras instalações</i>
<i>Demand</i>	<i>Informar os dados de demanda e o tipo de produto para cada cliente</i>
<i>Fleets</i>	<i>Informar a quantidade de veículos da transportadora</i> <ul style="list-style-type: none"> ● Informar o número de cada tipo de veículo da frota (Veículo autônomo, bicicleta, drone)
<i>Groups</i>	<i>Definir os grupos de clientes atendidos pela transportadora e outras instalações</i>
<i>Inventory</i>	<i>Definir a capacidade de estoque da transportadora</i>
<i>Locations</i>	<i>Informar a localização geográfica dos clientes, transportadora e outras instalações</i>
<i>Milk Run</i>	<i>Modelagem da programação de entregas da transportadora para cada veículo</i> <ul style="list-style-type: none"> ● Alterar os veículos de entrega na programação de entrega (Veículo autônomo, bicicleta, drone)
<i>Paths</i>	<i>Modelagem dos caminhos de ida e volta de cada veículo para cada grupo de clientes e outras instalações, custos com combustível e emissão de CO₂</i> <ul style="list-style-type: none"> ● Alterar custos e emissões de CO₂ para veículo escolhido (Veículo autônomo, bicicleta, drone)
<i>Periods</i>	<i>Definir o período de simulação</i>
<i>Products</i>	<i>Definir os tipos de produtos entregues</i>
<i>Shipping</i>	<i>Modelagem da política de entrega e horário de funcionamento da transportadora</i>
<i>Soucing</i>	<i>Modelagem da fonte de recurso e tipo de produtos para abastecimento de todas as instalações e clientes do modelo</i>
<i>Units Conversions</i>	<i>Definir o volume de cada produto transportado com base em seu peso</i>
<i>Vehicle Types</i>	<i>Informar os tipos de veículos da transportadora, capacidade de carga e velocidade</i> <ul style="list-style-type: none"> ● Criar os tipos de veículos a serem utilizados e sua capacidade de carga (Veículo autônomo, bicicleta, drone)

* Caso a transportadora não possua informações sobre as emissões de CO₂ dos veículos, esses dados poderão ser consultados em: <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/relatorios-e-publicacoes/>.

APÊNDICE C

Atividades que deverão ser desenvolvidas para aplicação do DISRUPSIM com adoção Centros de Consolidação Urbana (CCU)

1. Estabelecimento das bases do modelo
 - a) Base de dados – formalização da parceria com uma transportadora para obtenção de:
 - Definição da dimensão temporal (definição do período a ser estudado)
 - Localização do centro de distribuição da transportadora (informações geográficas)
 - Histórico de entregas realizadas (demanda dos clientes)
 - Dados sobre a frota da transportadora (número de veículos, capacidade de carga, velocidade, emissões de CO₂*, gasto médio com combustível de cada veículo)
 - Dados sobre os pedidos entregues (peso e volume)
 - Dados sobre as regiões atendidas (bairros, distritos e cidades atendidos)
 - Dados sobre o planejamento das entregas (programação e política de atendimento)
 - b) Elaboração de lógica de concepção dos cenários a serem simulados
2. Estabelecimento da base operacional do modelo
 - c) Base operacional – estruturação dos dados para modelagem e calibração do modelo com os dados obtidos em (1).
 - lista de tabelas utilizadas no *software* para entrada dos dados (Tabela 14):
3. Definição das medidas de desempenho utilizadas no modelo:
 - Distância percorrida (km)
 - Volume transportado (m³)
 - Gasto com combustível (R\$)
 - Número de viagens
 - Emissões de CO₂ (kg)
 - Taxa de ocupação dos veículos
4. Simulação de cenários:
 - Simulação de cenários iniciais
 - Análise dos resultados
 - Definição de iniciativas de *City logistics* para novos cenários a serem simulados
 - **Análise de sensibilidade (DoE) para instalações dos CCU's e análise dos novos parâmetros a serem simulados**

- **Realização de experimentos (geração de cenários comparativos com iniciativas de City logistics escolhidas, de acordo com as alterações destacadas na Tabela 13)**
5. Análise de indicadores de desempenho para os cenários simulados, com base nos resultados obtidos em “4”:
 - Custo por metro cúbico transportado
 - Custo por quilograma de CO₂
 - Custo por quilômetro rodado
 - Custo por pedido entregue
 6. Realização do cálculo da eficiência energética para os cenários simulados, com base nos resultados obtidos em “4”.

Tabela 15- Lista de tabelas utilizadas para modelagem no software

Nome da Tabela	Objetivo
<i>Costumers</i>	<i>Nomear os clientes, localização e tipologia</i>
<i>DC and Factories</i>	<i>Nomear o centro de distribuição da transportadora e outras instalações</i>
<i>Demand</i>	<i>Informar os dados de demanda e o tipo de produto para cada cliente</i>
<i>Fleets</i>	<i>Informar a quantidade de veículos da transportadora</i>
<i>Groups</i>	<i>Definir os grupos de clientes atendidos pela transportadora e outras instalações</i> <ul style="list-style-type: none"> • Definir os grupos atendidos de clientes atendidos por cada CCU.
<i>Inventory</i>	<i>Definir a capacidade de estoque da transportadora</i>
<i>Locations</i>	<i>Informar a localização geográfica dos clientes, transportadora e outras instalações</i>
<i>Milk Run</i>	<i>Modelagem da programação de entregas da transportadora para cada veículo</i> <ul style="list-style-type: none"> • Definir a programação de entregas para cada CCU de acordo com a demanda dos clientes atendidos e veículos a serem utilizados
<i>Paths</i>	<i>Modelagem dos caminhos de ida e volta de cada veículo para cada grupo de clientes e outras instalações, custos com combustível e emissão de CO₂</i>
<i>Periods</i>	<i>Definir o período de simulação</i>
<i>Products</i>	<i>Definir os tipos de produtos entregues</i>
<i>Shipping</i>	<i>Modelagem da política de entrega e horário de funcionamento da transportadora</i>
<i>Soucing</i>	<i>Modelagem da fonte de recurso e tipo de produtos para abastecimento de todas as instalações e clientes do modelo</i>
<i>Units Conversions</i>	<i>Definir o volume de cada produto transportado com base em seu peso</i>
<i>Vehicle Types</i>	<i>Informar os tipos de veículos da transportadora, capacidade de carga e velocidade</i>

* Caso a transportadora não possua informações sobre as emissões de CO₂ dos veículos, esses dados poderão ser consultados em: <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/relatorios-e-publicacoes/>.