São José dos Campos - SP
LV SBPO
LV Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional
São José dos Campos, SP - 6 a 9 de novembro de 2023

UMA ABORDAGEM DO PROBLEMA DE ENTREGA DIRETA EM UM CONTEXTO DE COMÉRCIO ELETRÔNICO

Maria Luíza Teixeira Santos
Franklina Maria Bragion Toledo
Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação - Universidade de São Paulo (USP)
Av. Trabalhador São-Carlense, 13566-590, São Carlos - SP, Brasil
marialuizats@usp.br
fran@icmc.usp.br

Mariá Cristina Vasconcelos Nascimento
Instituto Tecnológico de Aeronáutica
Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 - Vila das Acácias, 12228-900, São José dos Campos - SP, Brasil
mariah@ita.br

RESUMO

Atualmente, as empresas do setor do comércio eletrônico têm lidado com o surgimento de grandes desafios de planejamento da entrega de pedidos. Neste trabalho, busca-se estudar este problema a partir de um conjunto de centros de distribuição. O objetivo central é a redução dos custos de transporte para entrega dos pedidos. Para isso, é desenvolvido um modelo matemático com o objetivo de reduzir os custos de entrega levando em consideração a entrega direta e a existência de vários centros de distribuição. Variantes do modelo permitem a entrega fracionada e consideram a possibilidade de troca de produtos entre centros de distribuição. Experimentos computacionais foram realizados considerando diferentes níveis de estoque na empresa. Os resultados mostraram que, ao permitir a troca de produtos entre centros de distribuição e múltiplas entregas, há uma redução significativa nos custos de transporte associados à entrega dos produtos.

PALAVRAS CHAVE. Comércio Eletrônico, Logística, Programação Linear Inteira.

Tópicos: Logística e Transportes, Programação Matemática.

ABSTRACT

Nowadays, many e-commerce companies have been dealing with complex fulfillment challenges in delivering customer orders. This paper intends to study a delivery planning problem based on a set of distribution centers. The main objective is to reduce transportation costs for delivering. For such, we developed a mathematical model focusing on reducing direct delivery costs in a scenario with multiple distribution centers. Variants of this mathematical model allow adjustments for product exchanges at distribution centers and split delivery. Furthermore, we carried out computational experiments considering three stock scenarios. The results showed a significant reduction in the transportation costs associated with order deliveries when allowing product exchanges at distribution centers and split delivery.

KEYWORDS. E-commerce. Logistics. Integer Linear Programming.

Paper topics: Logistics and Transport, Mathematical Programming.

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174871
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174871

1. Introdução

O setor de comércio eletrônico (*e-commerce*) do Brasil vem apresentando um grande crescimento nos últimos anos. Segundo a Associação Brasileira de Comércio Eletrônico (ABCOMM), no primeiro semestre de 2020, o faturamento do setor cresceu 56,8% e o número de transações efetuadas aumentou cerca de 66% chegando a 105,6 bilhões [ABCOMM, 2021].

Pesquisas apontam que algumas características no processo de entrega, como a rapidez e a eficiência [Gaggero-Vásquez et al., 2022; Ma et al., 2021], são os principais alicerces para uma maior satisfação dos clientes e provável retorno dos mesmos às lojas utilizadas. Além disso, Vakulenko et al. [2019] destacam que entregas gratuitas, no mesmo dia, com horário definido ou retirada em locais preestabelecidos, são questões igualmente relevantes para os consumidores.

Ranathunga et al. [2022] e Shi et al. [2019] analisaram o problema de entrega visando a redução de custos de transporte e da distância percorrida. Ranathunga et al. [2022] desenvolveram um modelo matemático para tratar o problema considerando diferentes tipos de veículos disponíveis para entrega (veículos heterogêneos) e a geração de rotas de entrega. Os autores abordam os custos de transporte dos processos de primeira e última milhas. Os resultados obtidos apontam para uma redução de cerca de 34% nos custos e 42% na distância percorrida quando comparados ao modelo *baseline* desenvolvido pelos próprios autores. Shi et al. [2019] visam minimizar os custos de distribuição tendo como foco cumprir os prazos de entregas dos clientes. Os autores representam o problema como uma variante do problema de corte de estoque, nos quais os padrões de corte representam as rotas que podem ser selecionadas. Para avaliar sua proposta de resolução, Shi et al. [2019] utilizaram instâncias reais de uma empresa Chinesa. Os resultados obtidos mostraram uma redução de cerca de 19% na quantidade de veículos utilizados, 48% no tempo total de serviço e 19% na distância total percorrida, quando comparado à solução manual da empresa.

Zhang et al. [2019] estudaram o problema de entregas aos clientes respeitando uma data limite, por meio de uma frota de veículos homogênea e com diferentes tempos de chegada de produtos aos centros de distribuição. Além disso, não há roteamento de veículos para realização da entrega dos pedidos. Os resultados obtidos mostraram que uma baixa capacidade nos centros de distribuição pode levar a problemas de consolidação de pedidos, além de que os centros distribuídos aos arredores da cidade são mais benéficos para consolidação de pedidos quando comparados aos localizados no centro das cidades.

Li et al. [2019] investigaram um problema de roteamento de veículos em dois níveis (*Two-Echelon Capacitated Vehicle Routing Problem - 2E-CVRP*) levando em consideração a alocação e distribuição dos pedidos realizados por clientes em um cenário de comércio eletrônico. O primeiro nível é composto por armazéns e centros de distribuição, enquanto o segundo é composto pelos centros de distribuição e pelos clientes. Os clientes devem receber o pedido total, ou seja, uma única entrega, e não é possível realizar trocas de produtos entre dois armazéns ou dois centros de distribuição. Para resolução do problema, foi desenvolvido um modelo matemático e uma metaheurística ALNS (*Adaptive Large Neighborhood Search*). O ALNS obteve soluções melhores do que o pacote de otimização *CPLEX* 12.5.1 limitado por tempo, chegando a apresentar uma melhoria de cerca de 37% em alguns dos casos. Vale destacar que o tempo computacional da ALNS é de no máximo dois minutos, para instâncias pequenas, enquanto para o *CPLEX* foi estabelecido um tempo limite de oito horas.

O estudo aqui apresentado trata o problema de entrega de pedidos aos clientes em um cenário de comércio eletrônico. As entregas são realizadas de maneira direta através de centros de distribuição, ou seja, não há a possibilidade de roteamento das entregas. Para representar o problema é apresentado um modelo de otimização inteira mista. Duas variantes do problema são

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174871
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174871

consideradas. Na primeira, apenas a troca de produtos entre centros de distribuição é viável, na segunda, apenas a entrega fracionada é permitida. As instâncias-teste geradas consideram três níveis de estoque distintos na empresa (três cenários). Os resultados obtidos mostraram a importância e o benefício de permitir a troca de produtos entre centros de distribuição no contexto de entrega direta de pedidos.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma. Na Seção 2, é apresentada a definição do problema. Na Seção 3, o modelo matemático desenvolvido é descrito. Na Seção 4, são reportados os experimentos computacionais e as análises acerca dos resultados obtidos. Por fim, na Seção 5, as considerações finais e as pesquisas futuras são apresentadas.

2. Definição do Problema

O problema estudado consiste em tomar decisões sobre quando, como e por qual centro de distribuição os produtos serão enviados aos clientes de forma a atender seus pedidos. Essas decisões devem ser definidas visando minimizar os custos de entrega dos pedidos. No contexto estudado, as seguintes hipóteses foram assumidas para o planejamento da distribuição:

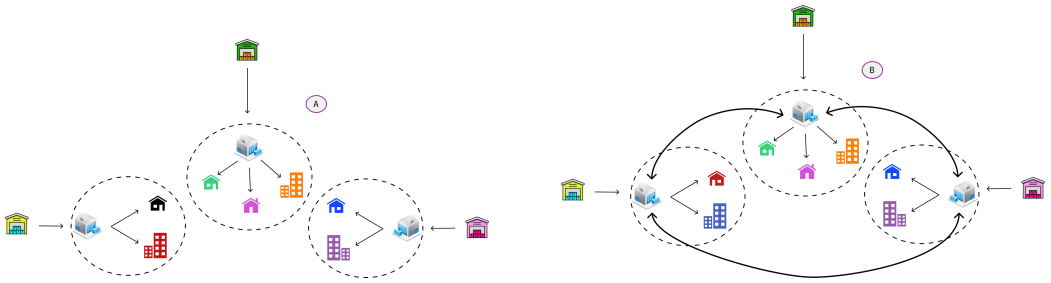
- há vários armazéns, e devido às suas localizações, cada um deles entrega seus produtos a apenas um centro de distribuição;
- o planejamento da entrega aos clientes é realizado diariamente;
- é permitido o envio de produtos entre os centros de distribuição;
- o pedido de um cliente é composto por um ou mais produtos;
- cada cliente deve receber seu pedido completo, podendo ou não haver entrega fracionada (*split-delivery*). Neste caso, são permitidas no máximo duas entregas;
- a frota de veículos é heterogênea;
- os custos de envio para os clientes e de transporte entre os centros de distribuição são conhecidos.

No contexto estudado, o processo de entrega é realizado da seguinte forma. Quando a empresa recebe um pedido, os produtos demandados são enviados de um armazém para seu respectivo centro de distribuição, e posteriormente para o cliente, conforme ilustrado na Figura 1a. Caso um armazém não tenha todos os produtos demandados no pedido, é necessário consolidar os produtos em algum centro de distribuição antes da entrega, envolvendo a transferência de produtos do pedido entre centros de distribuição, conforme ilustrado na Figura 1b.

Um outro ponto relevante em um sistema de distribuição com possibilidade de armazenamento é a definição dos níveis de estoque de acordo com as demandas. No contexto estudado, considera-se que o estoque disponível é suficiente para atender os pedidos realizados.

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174871
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174871

Figura 1: Exemplos de possibilidades de entrega de pedidos.



(a) Sem troca entre centros de distribuição.

(b) Com troca entre centros de distribuição.

Fonte: Elaborada pela autora utilizando imagens extraídas de Freepik (2023), Vecteezy (2023) e VectorStock (2023).

3. Modelagem Matemática

Para representar o problema estudado, foi desenvolvido um modelo de otimização inteiro misto, baseado na literatura [Li et al., 2019]. O principal objetivo foi a minimização dos custos de entrega direta de pedidos aos clientes.

Nesta modelagem, assume-se por hipótese que os pedidos dos clientes são encaminhados diretamente, ou seja, não são estabelecidas rotas de entregas para grupos de clientes, com a possibilidade de mais de uma entrega por cliente (*split-delivery*) e de troca de produtos entre centros de distribuição, o que não é permitido no trabalho desenvolvido por Li et al. [2019]. Os conjuntos, os parâmetros e as variáveis do modelo são descritos a seguir. O modelo matemático é dado por (1) - (10).

Conjuntos	
B	conjunto de produtos, $B = \{1, 2, ..., N\}$, em que N é o número de produtos;
V	conjunto de veículos, $V = \{1, 2, ..., K\}$, em que K é o número de veículos;
A	conjunto de centros de distribuição, $A = \{1, 2, ..., L\}$, em que L é o número de centros de distribuição;
C	conjunto de clientes finais, $C = \{L+1, ..., L+M\}$, em que M é o número de clientes finais;
CA	união do conjunto de clientes finais e do conjunto de centros de distribuição ($CA = C \cup A$).
Parâmetros	
Cap^k	capacidade do veículo k (em peso);
p_b	peso do produto b;
q_{bc}	quantidade de produtos do tipo b adquirida pelo cliente c;
c_{ij}^k	custo para ir do centro de distribuição/cliente i para o centros de distribuição/cliente j com o veículo k;
I_{bi}^0	estoque inicial do produto do tipo b no centros de distribuição i.

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174871
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174871

Variáveis de Decisão	
x_{ij}^k	é igual a 1 se o veículo k sai do centro de distribuição/cliente i para o centro de distribuição/cliente j, caso contrário é igual a 0;
s_{bij}	quantidade de produtos do tipo b transportados do centro de distribuição/cliente i para o centro de distribuição/cliente j.

$$\min \sum_{k \in V} \sum_{i \in A} \sum_{j \in CA, j \neq i} c_{ij}^k \, x_{ij}^k \tag{1}$$

$$s.a \sum_{k \in V} x_{ij}^k \leq 1 \qquad \forall i, j \in A, i \neq j \tag{2}$$

$$\sum_{k \in V} \sum_{i \in A} x_{ij}^k \leq 2 \qquad \forall j \in C \tag{3}$$

$$\sum_{i \in A} \sum_{j \in CA, j \neq i} x_{ij}^k \leq 1 \qquad \forall k \in V \tag{4}$$

$$\sum_{b \in B} p_b \, s_{bij} \leq \sum_{k \in V} Cap^k \, x_{ij}^k \qquad \forall i \in A, \, \forall j \in CA, j \neq i \tag{5}$$

$$q_{bj} = \sum_{i \in A} s_{bij} \qquad \forall b \in B, \, \forall j \in C \tag{6}$$

$$s_{bij} \leq q_{bj} \sum_{k \in V} x_{ij}^k \qquad \forall b \in B, \, \forall j \in C \tag{7}$$

$$\sum_{j \in A, j \neq i} s_{bij} + \sum_{j \in C} s_{bij} \leq I_{bi}^0 + \sum_{j \in A, j \neq i} s_{bji} \qquad \forall b \in B, \, \forall i \in A \tag{8}$$

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\} \qquad \forall k \in V, \forall i \in A, \, \forall j \in CA, j \neq i \tag{9}$$

$$s_{bij} \geq 0 \qquad \forall b \in B, \forall i \in A, \, \forall j \in CA, j \neq i \tag{10}$$

A função objetivo (1) representa a minimização da soma dos custos de transporte entre os centros de distribuição e os clientes finais. As restrições (2) permitem que haja troca de produtos entre os centros de distribuição. O conjunto de restrições (3) garante que no máximo dois veículos deixem os centros de distribuição i em direção ao cliente j, assegurando que todos os clientes sejam atendidos em no máximo duas entregas (*split-delivery*). As restrições (4) estabelecem que cada veículo pode realizar no máximo uma entrega. As restrições (5) impõem que a capacidade de cada veículo é respeitada. Os conjuntos de restrições (6) e (7) indicam que a quantidade de produtos transportados do centro de distribuição i para o cliente j deve ser igual à quantidade do produto b adquirida pelo cliente j. As restrições (8) garantem o balanceamento dos estoques, ou seja, a quantidade do produto b transportada do centro de distribuição i para outro centro de distribuição e para os clientes é igual ao estoque inicial somado à quantidade recebida de outros centros de distribuição. Os conjuntos de restrições (9) e (10) definem o domínio das variáveis de decisão.

3.1. Restringido a Entrega Fracionada

No setor do comércio eletrônico, é fortemente desejável que cada cliente receba seu pedido completo, ou seja, que não seja permitida a entrega fracionada. Neste caso, o modelo (1) - (10) pode ser facilmente adaptado eliminando as restrições (3), (6) e (7), e adicionando ao modelo as restrições (11) e (12).

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174871
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174871

$$\sum_{k \in V} \sum_{i \in A} x_{ij}^{k} = 1 \qquad \forall j \in C \tag{11}$$

$$q_{bj} \sum_{k \in V} x_{ij}^{k} = s_{bij} \qquad \forall b \in B, \forall i \in A, \ \forall j \in C \tag{12}$$

O conjunto de restrições (11) garante que no máximo um veículo deixe um centro de distribuição i em direção ao cliente j, assegurando que todos os clientes sejam atendidos em uma única entrega. O conjunto de restrições (12) indica que a quantidade de produtos transportados do centro de distribuição i para o cliente j deve ser igual à quantidade do produto b adquirida pelo cliente.

3.2. Restringido Troca entre Centros de Distribuição

Em algumas situações, devido à posição geográfica dos centros de distribuição ou a questões administrativas, não é permitida a troca de produtos entre os centros de distribuição. Neste caso, para viabilizar o atendimento dos pedidos dos clientes, pode ser necessário realizar mais de uma entrega. O modelo (1) – (10) pode ser adaptado para tratar esta situação eliminando as restrições (2).

4. Experimentos Computacionais

Os experimentos computacionais foram conduzidos para analisar os custos de transporte considerando três situações: i) são permitidas até duas entregas por cliente (entrega fracionada) e a troca de produtos entre os centros de distribuição (Modelo 1); ii) a entrega fracionada não é permitida (Modelo 2); e iii) a troca de produtos entre centros de distribuição não é permitida (Modelo 3). Também foram considerados três níveis de estoque nos armazéns.

Os experimentos computacionais foram realizados em um computador com sistema operacional Ubuntu 22.04, processador Intel Core i7 8^a Geração CPU 3.20GHz e 8GB de Memória RAM. Os modelos foram descritos utilizando a biblioteca *gurobipy*, disponível na linguagem de programação Python 3.9. O *solver* utilizado foi o Gurobi (9.5.2).

4.1. Geração de Instâncias

As instâncias utilizadas foram geradas a partir de endereços do município de Guarulhos-SP, extraídos da base de dados do *Open Adresses* [2014], seguindo o tutorial de Sartori e Buriol [2020]. O cálculo da distância entre os endereços foi realizado através da biblioteca Haversine [2023] disponível para linguagem Python. Estas distâncias foram utilizadas como valores para os custos de transporte, além do custo por tipo de veículo utilizado.

Foram definidas cinco instâncias com 500 endereços cada. A Figura 2 ilustra os clientes (marcadores vermelhos) para uma instância exemplo (Instância 1). Dois centros de distribuição foram posicionados em endereços próximos às rodovias do município de Guarulhos-SP. Foram considerados 100 tipos de produtos extraídos da base de dados do cenário brasileiro de comércio eletrônico da Olist [2022], assim como os seus respectivos pesos.

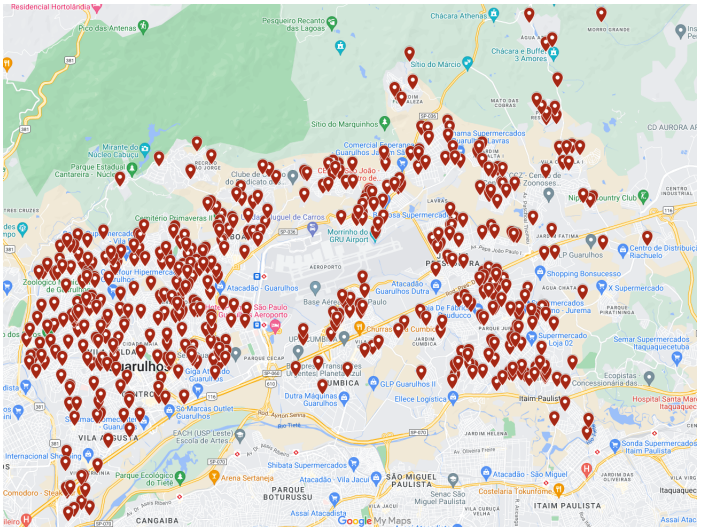
Os pedidos dos clientes foram gerados tendo entre 2 e 10 produtos, da base Olist [2022], seguindo a distribuição apresentada por Hübner et al. [2015] (ver Tabela 1). De acordo com os autores, um a quatro produtos representam os valores mais recorrentes em compras na internet.

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174871
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174871

Tabela 1: Número de Produtos em cada instância [Hübner et al., 2015].

Classe	Número de Produtos	Probabilidade
1	1 a 2	50%
2	2 a 3	25%
3	3 a 4	8%
4	4 ou mais	16%

Figura 2: Ilustração dos Endereços da Instância 1 (500 clientes).



Fonte: Elaborada pela autora com coordenadas representadas no Google Maps (2023).

Para definição dos níveis de estoque de cada produto nos centros de distribuição, primeiramente, uma matriz de ocorrências é gerada. A probabilidade de um produto estar disponível em cada um dos centros ou nos dois é igual, ou seja, 33% para cada caso. Desta forma, há uma probabilidade maior de um produto estar disponível em apenas um centro de distribuição (66%).

Para cada produto, o nível de estoque é gerado considerando três cenários. Para os dois primeiros cenários, a quantidade em estoque dos produtos que estão disponíveis em apenas um centro de distribuição é igual a 110% da soma de sua demanda nos pedidos, enquanto que para o último esse valor cai para 105%. No entanto, quando um produto está presente nos dois centros de distribuição, as quantidades em cada centro de distribuição é, respectivamente, 70% e 80% da soma da demanda do produto, para os dois primeiros cenários, enquanto para o terceiro cenário é gerado um valor aleatório (VA) no intervalo entre 10% e 100% para o primeiro centro de distribuição, enquanto o segundo centro de distribuição recebe 100% - VA. Na Tabela 2, são resumidos os valores dos níveis de estoque para os três cenários. Como pode-se observar, o terceiro cenário apresenta os menores níveis de estoque quando os produtos estão nos dois centros de distribuição, permitindo um número reduzido de possibilidades de entrega.

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174871
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174871

Tabela 2: Representação dos cenários considerados.

	Níveis de estoque	
Cenário	Centro de distribuição Exclusivo	Ambos os Centros
1	110%	70% cada
2	110%	80% cada
3	105%	VA* e 100% - VA*

VA* - Valor Aleatório entre 10 e 100.

Consideram-se três tipos de veículos: pequeno, médio e grande, com custos associados aos valores 1, 2 e 3, respectivamente. Para o pequeno, a capacidade é de 10kg. Este valor foi definido após análise das opções de transporte de cargas utilizando motocicletas disponíveis no varejo. Para os veículos médio e grande, seguiram-se os dados dos Correios [2020], com capacidades de 1200kg e 7500kg, respectivamente. A quantidade de cada tipo de veículo obedece a seguinte abordagem: para veículos pequenos, a quantidade é igual ao dobro do número de pedidos; para os veículos médios é calculada a soma dos pesos dos pedidos (SP) e o número de veículos é dado por: $\lceil 1,5 \times \frac{SP}{1200} \rceil$, e são considerados apenas 4 veículos grandes, pois, em geral, são utilizados apenas para transportes entre centros de distribuição (neste trabalho temos apenas dois centros de distribuição).

4.2. Resultados dos Experimentos

As instâncias geradas foram resolvidas utilizando o software de otimização Gurobi (9.5.2) em sua configuração padrão. Para a abordagem com possibilidade de entrega fracionada e troca entre centros de distribuição (Modelo 1), os resultados obtidos são apresentados na Tabela 3. Na Tabela 4, são apresentados os resultados obtidos considerando que não é permitido o fracionamento da entrega, mas é permitida a troca de produtos entre os centros de distribuição (Modelo 2), enquanto, na Tabela 5, são apresentados os resultados do modelo onde a entrega fracionada é permitida, mas a troca de produtos entre os centros de distribuição não é permitida (Modelo 3). Nas tabelas, na primeira coluna é destacada a instância. Nas demais colunas, são reportados, respectivamente, o valor da melhor solução encontrada (F.O.), o número de veículos utilizados, separados por tipos, a quantidade de clientes atendidos por duas entregas (M.E.), e o tempo computacional gasto pelo software (Tempo (s)). Essas informações são apresentadas para cada cenário estudado.

Como pode-se observar, para todas as instâncias foi encontrada uma solução ótima em um tempo inferior a 9 minutos. Como todos os modelos abordam a entrega direta, a quantidade de veículos utilizados para entrega aos clientes é maior ou igual à quantidade de clientes (500 clientes) e, como esperado, a maioria dos veículos utilizados era de pequeno porte (motocicletas). Em especial, para o Modelo 3, em que a troca de produtos entre os centros de distribuição não é permitida, tem-se um aumento significativo no número de entregas. Esse aumento se dá por não poder haver trocas entre os centros de distribuição e ser necessária a realização de mais de uma entrega para uma maior quantidade de clientes, como apresentado na coluna M.E. da Tabela 5.

Comparando os valores das soluções ótimas encontradas, pode-se observar uma diferença significativa entre os modelos que permitem a troca entre centros de distribuição (Modelos 1 e 2) e o que não permite (Modelo 3). Em média, comparando os resultados dos Modelos 1 e 3 a redução é de cerca de 49%, enquanto que considerando os Modelos 2 e 3 a redução é de cerca de 48%. Ao comparar os Modelos 1 e 2, fica claro que apenas a entrega fracionada não traz tantos benefícios, já que a média de redução fica em torno de 0,5%. Desta forma, uma melhoria significativa entre os modelos pode ser percebida com a possibilidade de troca de produtos entre os centros de

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174871
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174871

distribuição. Do ponto de vista dos cenários, não há diferença no custos das soluções ótimas para os Modelos 1 e 2, em que a troca entre centros de distribuição é permitida. No entanto, quando a troca entre centros de distribuições não é permitida (Modelo 3), se torna evidente que o número maior de entregas fracionárias eleva os custos de entrega (ver Tabela 5). Na Figura 3, são apresentados os valores das soluções obtidas para a Instância 3 considerando os três modelos e os três cenários gerados. Vale ressaltar que os comportamentos de todas as instâncias foram bastante semelhantes.

Tabela 3: Resultados computacionais considerando a possibilidade de entrega fracionada e de troca de produtos entre centros de distribuição (Modelo 1).

	Cenário 1				Cenário 2				Cenário 3			
Instância	F.O.	Veículos	M.E.	Tempo (s)	F.O.	Veículos	M.E.	Tempo (s)	F.O.	Veículos	M.E.	Tempo (s)
1	2520,99	[504, 2, 0]	4	48	2520,99	[504, 2, 0]	4	49	2520,99	[504, 2, 0]	4	49
2	2460,68	[505, 2, 0]	5	53	2460,68	[505, 2, 0]	5	53	2460,68	[505, 2, 0]	5	56
3	2446,71	[503, 2, 0]	3	527	2446,71	[503, 2, 0]	3	245	2446,71	[503, 2, 0]	3	47
4	2485,79	[502, 2, 0]	2	46	2485,79	[502, 2, 0]	2	46	2485,79	[502, 2, 0]	2	51
5	2449,94	[504, 2, 0]	4	50	2449,94	[504, 2, 0]	4	49	2449,94	[504, 2, 0]	4	40

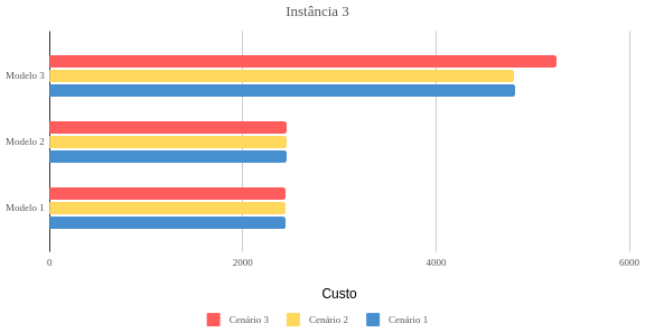
Tabela 4: Resultados computacionais considerando que não é permitido o fracionamento da entrega e tendo a possibilidade de troca de produtos entre centros de distribuição (Modelo 2).

	Cenário 1			Cenário 2			Cenário 3		
Instância	F.O.	Veículos	Tempo (s)	F.O.	Veículos	Tempo (s)	F.O.	Veículos	Tempo (s)
1	2537,93	[496, 3, 3]	39	2537,93	[496, 3, 3]	51	2537,93	[496, 3, 3]	372
2	2477,50	[495, 3, 4]	19	2477,50	[495, 3, 4]	41	2477,50	[495, 3, 4]	33
3	2453,87	[497, 3, 2]	390	2453,87	[497, 3, 2]	47	2453,87	[497, 3, 2]	335
4	2487,67	[498, 3, 1]	58	2487,67	[498, 3, 1]	29	2487,67	[498, 3, 1]	299
5	2463,62	[496, 3, 3]	99	2463,62	[496, 3, 3]	56	2463,62	[496, 3, 3]	65

Tabela 5: Resultados computacionais considerando a possibilidade de entrega fracionada, mas não é permitida a troca de produtos entre centros de distribuição (Modelo 3).

	Cenário 1				Cenário 2				Cenário 3			
Instância	F.O.	Veículos	M.E.	Tempo (s)	F.O.	Veículos	M.E.	Tempo (s)	F.O.	Veículos	M.E.	Tempo (s)
1	4965,22	[596, 0, 0]	96	15	4965,22	[596, 0, 0]	96	16	5383,60	[619, 0, 0]	119	150
2	5155,05	[623, 0, 0]	123	15	5155,05	[623, 0, 0]	123	16	5289,14	[643, 1, 0]	144	260
3	4815,67	[575, 0, 0]	75	16	4811,14	[574, 0, 0]	74	14	5244,62	[631, 0, 0]	131	216
4	4609,85	[586, 0, 0]	86	14	4609,85	[586, 0, 0]	86	15	4788,89	[607, 0, 0]	107	218
5	4734,39	[589, 0, 0]	89	15	4734,39	[589, 0, 0]	89	15	5716,76	[653, 0, 0]	153	333

Figura 3: Ilustração dos custos das soluções ótimas obtidas para a Instância 3.



DOI: 10.59254/sbpo-2023-174871
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174871

5. Conclusões e Pesquisas Futuras

Na pesquisa apresentada, um modelo matemático foi desenvolvido para resolução do problema de entrega de pedidos a clientes, problemática frequente na área de entrega de última milha do setor do comércio eletrônico. O modelo busca realizar entregas de forma direta entre centros de distribuição e clientes, havendo permissão de troca de produtos entre centros de distribuição e possibilidade de entrega fracionada. Duas variantes do problema foram estudadas. Na primeira, pode ocorrer apenas a troca entre centros de distribuição, enquanto na segunda, apenas a entrega fracionada dos pedidos pode ser realizada. Além disso, três cenários de estoque foram gerados.

Como esperado, a possibilidade de realizar trocas entre centros de distribuição gerou uma redução significativa nos custos de entrega dos pedidos aos clientes. Para as instâncias avaliadas, a redução chegou a até 52%. A possibilidade de realizar apenas a entrega fracionada não trouxe benefícios às instâncias analisadas, uma vez que os custos das soluções obtidas foram significativamente elevados em comparação aos demais resultados obtidos. Ademais, a comparação entre os diferentes cenários de estoque mostrou que a possibilidade de troca entre centros de distribuição contribui consideravelmente para níveis de estoque mais baixos, uma vez que neste contexto há uma menor possibilidade de entrega por um único centro.

Baseado nas análises e conforme previsto, a redução do número de entregas diretas leva a redução dos custos, logo, como pesquisas futuras, seria importante incorporar a possibilidade de roteamento de veículos na realização das entregas. O problema resultante seria de difícil resolução, portanto, muito provável que seja necessário o desenvolvimento de métodos de resolução para o tratamento de instâncias de dimensões reais do comércio eletrônico.

Agradecimentos

Agradecimento à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio financeiro concedido (Processos 2022/01022-7 (bolsa país) e 2013/07375-0 (CEPID-CeMEAI)), à CAPES pelo apoio ao programa de Pós-Graduação (Proex 88887.658565/2021-00) e ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq) (309161/2022-3, 403735/2021-1). As autoras também agradecem ao Laboratório de Otimização do ICMC/USP (LOt).

Referências

ABCOMM (2021). Faturamento do e-commerce cresce 56,8% neste ano e chega a R$41,92 bilhões. https://abcomm.org/noticias/faturamento-do-e-commerce-cresce-568-neste-ano-e-chega-a-r-4192-bilhoes/. Acessado: 2023-05-17.

Balthazar., R. (2023). Haversine. https://github.com/mapado/haversine. Acessado: 2023-05-17.

Company, F. (2023). Freepik. https://www.freepik.com/. Acessado: 2023-05-17.

Correios (2020). Especificação técnica - Correios. www2.correios.com.br/institucional/licit_compras_contratos/licitacoes/anexos/EDI_PGE20003_2020_118916.pdf. Acessado: 2023-05-17.

Dees, I. e Ingalls, N. (2014). Open adresses. https://openaddresses.io/. Acessado: 2023-05-17.

Gaggero-Vásquez, M., Mercado-Daneri, V., e Chavez-Ugaz, R. (2022). The impact of the global context on last-mile delivery and the relationship with the e-commerce channel. In *2022 Congreso Internacional de Innovación y Tendencias en Ingeniería (CONIITI)*, p. 1–4.

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174871
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174871

Hübner, A., Holzapfel, A., e Kuhn, H. (2015). Operations management in multi-channel retailing: an exploratory study. *Operations Management Research*, 8(3-4):84–100.

Inc., E. (2023). Vecteezy. https://www.vecteezy.com/. Acessado: 2023-05-17.

Li, X., Li, J., Aneja, Y., Guo, Z., e Tian, P. (2019). Integrated order allocation and order routing problem for e-order fulfillment. *IISE Transactions*, 51(10):1128–1150.

LLC., G. (2023). Google my maps. https://www.google.com/maps/d/. Acessado: 2023-05-17.

Ma, H., Kuang, H., e Huang, M. (2021). A last-mile delivery problem with alternative delivery options based on prospect theory. In *2021 33rd Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, p. 4202–4207.

Media, V. (2023). Vectorstock. https://www.vectorstock.com/. Acessado: 2023-05-17.

Olist (2022). Brazilian e-commerce public dataset by olist. https://www.kaggle.com/datasets/olistbr/brazilian-ecommerce?resource=download&select=olist_products_dataset.csv. Acessado: 2023-05-17.

Ranathunga, M. I. D., Wijayanayake, A. N., e Niwunhella, D. H. H. (2022). Simulation-based efficiency assessment of integrated first-mile pickup and last-mile delivery in an e-commerce logistics network. In *2022 International Research Conference on Smart Computing and Systems Engineering (SCSE)*, p. 246–253.

Sartori, C. S. e Buriol, L. S. (2020). Instâncias para roteamento de veículos usando dados abertos. *Pesquisa Operacional para o Desenvolvimento*, 12:1–11.

Shi, H., Sun, L., Teng, Y., e Hu, X. (2019). An online intelligent vehicle routing and scheduling approach for b2c e-commerce urban logistics distribution. *Procedia Computer Science*, 159: 2533–2542.

Vakulenko, Y., Shams, P., Hellström, D., e Hjort, K. (2019). Online retail experience and customer satisfaction: the mediating role of last mile delivery. *The International Review of Retail, Distribution and Consumer Research*, 29(3):306–320.

Zhang, Y., Sun, L., Hu, X., e Zhao, C. (2019). Order consolidation for the last-mile split delivery in online retailing. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 122: 309–327.

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174871
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174871