

CAIO FERREIRA DA ROSA PANTAROTTO

**Otimização do roteamento e programação de veículo e drone aplicada a
*last mile delivery***

Versão Original

Trabalho de formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do diploma de
engenheiro de produção.

São Paulo

2018

CAIO FERREIRA DA ROSA PANTAROTTO

**Otimização do roteamento e programação de veículo e drone aplicada a
*last mile delivery***

Versão Original

Trabalho de formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do diploma de
engenheiro de produção.

Orientador:
Prof. Dr. Leonardo Junqueira

São Paulo

2018

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catalogação-na-publicação

Pantarotto, Caio Ferreira da Rosa
Otimização do roteamento e programação de veículo e drone aplicada a last mile delivery / C. F. R. Pantarotto -- São Paulo, 2018.
104 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Produção.

1.problemas de roteamento e programação de veículos 2.programação linear inteira mista 3.drones 4.last mile delivery I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Produção II.t.

A GRADECIMENTO

Gostaria de agradecer a todos que fizeram parte desta jornada que se encerra com esta publicação.

Primeiramente, aos meus pais, que me garantiram a melhor educação possível que alguém pode ter.

Ao Leonardo, pela oportunidade e pelo direcionamento.

Ao FeS, que me enche de risadas todos os dias.

À Turim, que foi minha casa durante uma das mais enriquecedoras experiências que tive e que me permitiu conhecer pessoas incríveis que quero levar para o resto da minha vida.

À AAAP e aos Wetrats, por simplesmente fazerem todos os meus dias ao longo desses seis anos, por tornarem à Poli o melhor lugar para se estar.

À Mary, que sempre esteve ali, do meu lado, em quase todos os instantes dessa minha vida universitária e a quem devo muito do que sou e quem quero ser.

RESUMO

O transporte de um bem de seu último ponto de armazenagem até o seu recebedor final recebe o nome de *last mile delivery*, e é normalmente o trecho mais ineficiente do processo de entrega, apresentando altos custos em comparação à distância percorrida. O maior desafio da *last mile delivery* está relacionado aos altos custos com mão-de-obra e os desperdícios inerentes ao processo. Soma-se a isso o fato de que os clientes têm se tornado mais exigentes, demandando entregas precisas, rápidas e com baixo preço.

A introdução de drones percorrendo o último trecho da entrega pode então contribuir para um processo mais eficiente, permitindo uma redução do uso de ativos tais como mão-de-obra e caminhões, além de possibilitar entregas mais velozes, sobretudo em zonas rurais, que apresentam menos barreiras para a introdução da tecnologia. Diante dessa potencialidade, o estudo de modelos de otimização se faz necessário, sobretudo para que se possa, posteriormente, entender a viabilidade econômica em questão.

Para entender qual problema de otimização seria mais aplicável à situação, um estudo sobre as características da *last mile delivery* e da aplicabilidade de drones a ela foi feito, culminando-se em um modelo de entrega compartilhada entre caminhão e drone, denominado recentemente na literatura de *Flying Sidekick Traveling Salesman Problem* (FSTSP), problema que foi revisitado neste trabalho. O problema trata da situação de um caminhão carregando um drone, o qual pode partir do caminhão, realizar uma entrega a um cliente e então retornar para o caminhão. O modelo de programação linear inteira mista resultante foi implementado em uma linguagem de modelagem e resolvido com aplicativos de otimização, utilizando exemplos gerados aleatoriamente com parâmetros e cenários condizentes com o contexto rural do problema.

Uma análise de sensibilidade foi realizada, considerando variações na velocidade média do drone, sua autonomia, a distribuição dos clientes em torno do centro de distribuição e o número de clientes. Notou-se que a partir de 10 clientes o modelo não se mostra capaz de atingir a solução ótima dentro do limite de tempo definido. Concluiu-se que, para as condições do problema, o principal fator determinante para a maior efetividade do drone é sua autonomia em distância.

Palavras-chave: (i) problemas de roteamento e programação de veículos; (ii) programação linear inteira mista; (iii) drones; (iv) *last mile delivery*.

ABSTRACT

A good transportation from the storage to the final customer receives the name of last mile delivery, and it is often the least efficient route of the delivery process, presenting high costs when compared to the total distance traveled. The biggest challenge on the last mile delivery is related to the high labour costs and the wastes inherent to the process. In addition, customers have became more rigid, excepting precise, fast and costless deliveries.

The introduction of drones as responsible for the last mile delivery can contribute to a more efficient process, allowing an asset reduction usage, such as labour costs and trucks, making it possible to deliveries to become faster, mainly on rural areas, where the entrance barriers are lower. In face of that, the study of optimization models becomes necessary, especially to understand the technology's economic viability.

In order to understand which optimization problem is best suited to the situation, a study over the characteristics of the last mile delivery and its applicability to the drones was made, reaching a shared delivery model between truck and drone, recently named on the literature as Flying Sidekick Traveling Salesman Problem (FSTSP), which was reviewed on this work. The problem studies the situation in which a truck carries a drone, which can departure from the truck, makes a delivery to a customer and then return to the truck. The mixed integer linear programming problem was implemented using an optimization solver language on modelling language, and the scenarios used were randomly generated with parameters's value that fit the rural context.

Finally, a sensitive analysis was made, considering variations on the drones's average speed, its range, the customers' distribution around the distribution center and the number of clients. It was observed that starting from 10 clients the model is not able to reach the optimal solution within the established time limit of one hour. It was possible to conclude that the most relevant factor to shorten the lead time of the deliveries was the drone's endurance in terms of distance.

Key-words: (i) vehicle routing and scheduling problems; (ii) mixed integer linear programming; (iii) drones; (iv) last mile delivery.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Parcada dos clientes escolhendo entre as opções de entrega.....	26
Figura 2.2 - Parcada dos clientes que não compraram o produto devido a longos tempos de entrega.....	26
Figura 2.3 - Principal <i>trade-off</i> encontrado por operadores logísticos na <i>last mile delivery</i>	27
Figura 2.5 - Modelo de drone <i>Amazon Prime Air</i>	33
Figura 2.6 - Modelo de drone <i>Matternet</i>	34
Figura 3.1 - Ilustração do modelo de “centro de distribuição centralizado”	44
Figura 3.2 - Ilustração do modelo de “múltiplos centros de partida com centro de distribuição centralizado”	45
Figura 3.3 - Ilustração do modelo de “entrega compartilhada entre drone e caminhão”	46
Figura 4.1 - Ilustração de cenário do FSTSP.....	50
Figura 6.1 - Análise do ganho relativo com drones em situação de distribuição exponencial.....	63
Figura 6.2 - Análise do ganho relativo com drones em situação de distribuição uniforme	63
Figura 6.3 - Apresentação da solução com maior ganho relativo da função objetivo.....	64
Figura B.1 - Distribuição exponencial clientes e centro distribuição no cenário 1 com 5 clientes	79
Figura B.2 - Distribuição exponencial clientes e centro distribuição no cenário 2 com 5 clientes	80
Figura B.3 - Distribuição exponencial clientes e centro distribuição cenário 3 com 5 clientes	81
Figura B.4 - Distribuição exponencial clientes e centro distribuição cenário 1 com 7 clientes	82
Figura B.5 - Distribuição exponencial clientes e centro distribuição cenário 2 com 7 clientes	83
Figura B.6 - Distribuição exponencial clientes e centro distribuição cenário 3 com 7 clientes	84
Figura B.7 - Distribuição exponencial clientes e centro distribuição cenário 1 com 9 clientes	85
Figura B.8 - Distribuição exponencial clientes e centro distribuição cenário 2 com 9 clientes	86
Figura B.9 - Distribuição exponencial clientes e centro distribuição cenário 3 com 9 clientes	87
Figura B.10 - Distribuição exponencial clientes e centro distribuição cenário 1 com 11 clientes	88
Figura B.11 - Distribuição exponencial clientes e centro distribuição cenário 2 com 11 clientes	89
Figura B.12 - Distribuição exponencial clientes e centro distribuição cenário 3 com 11 clientes	90
Figura B.13 - Distribuição uniforme clientes e centro distribuição cenário 1 com 5 clientes.....	91
Figura B.14 - Distribuição uniforme clientes e centro distribuição cenário 2 com 5 clientes.....	92
Figura B.15 - Distribuição uniforme clientes e centro distribuição cenário 3 com 5 clientes.....	93
Figura B.16 - Distribuição uniforme clientes e centro distribuição cenário 1 com 7 clientes.....	94
Figura B.17 - Distribuição uniforme clientes e centro distribuição cenário 2 com 7 clientes.....	95
Figura B.18 - Distribuição uniforme clientes e centro distribuição cenário 3 com 7 clientes.....	96
Figura B.19 - Distribuição uniforme clientes e centro distribuição cenário 1 com 9 clientes.....	97
Figura B.20 - Distribuição uniforme clientes e centro distribuição cenário 2 com 9 clientes.....	98
Figura B.21 - Distribuição uniforme clientes e centro distribuição cenário 3 com 9 clientes.....	99
Figura B.22 - Distribuição uniforme clientes e centro distribuição cenário 1 com 11 clientes.....	100

Figura B.23 - Distribuição uniforme clientes e centro distribuição cenário 2 com 11 clientes 101

Figura B.24 - Distribuição uniforme clientes e centro distribuição cenário 3 com 11 clientes 102

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Variáveis do processo de entrega	30
Tabela 5.1 - Conjuntos	51
Tabela 5.2 - Variáveis de decisão.....	52
Tabela 5.3 - Parâmetros.....	52
Tabela 6.1 - Resultados obtidos com os testes de acordo com cada cenário.....	59
Tabela 6.2 - Ganho relativo na comparação da função objetivo com drones vs sem drones	60
Tabela 6.3 - Número médio de clientes atendidos por drones em cada cenário.....	61
Tabela 6.4 - Número relativo de clientes atendidos por drone em comparação com total de clientes de cada modelo	62
Tabela 6.5 - Número de variáveis do modelo de acordo com número de clientes	65
Tabela 6.6 - Tempo de execução médio do modelo, em segundos	66
Tabela B.1 - Distâncias entre nós com distribuição uniforme no cenário 1 com 5 clientes	79
Tabela B.2 - Distâncias entre nós com distribuição uniforme no cenário 2 com 5 clientes	80
Tabela B.3 - Distâncias entre nós com distribuição uniforme no cenário 3 com 5 clientes	81
Tabela B.4 - Distâncias entre nós com distribuição uniforme no cenário 1 com 7 clientes	82
Tabela B.5 - Distâncias entre nós com distribuição uniforme no cenário 2 com 7 clientes	83
Tabela B.6 - Distâncias entre nós com distribuição uniforme no cenário 3 com 7 clientes	84
Tabela B.7 - Distâncias entre nós com distribuição uniforme no cenário 1 com 9 clientes	85
Tabela B.8 - Distâncias entre nós com distribuição uniforme no cenário 2 com 9 clientes	86
Tabela B.9 - Distâncias entre nós com distribuição uniforme no cenário 3 com 9 clientes	87
Tabela B.10 - Distâncias entre nós com distribuição exponencial no cenário 1 com 11 clientes	88
Tabela B.11 - Distâncias entre nós com distribuição exponencial no cenário 2 com 11 clientes	89
Tabela B.12 - Distâncias entre nós com distribuição exponencial no cenário 3 com 11 clientes	90
Tabela B.13 - Distâncias entre nós com distribuição uniforme no cenário 1 com 5 clientes	91
Tabela B.14 - Distâncias entre nós com distribuição uniforme no cenário 2 com 5 clientes	92
Tabela B.15 - Distâncias entre nós com distribuição uniforme no cenário 3 com 5 clientes	93
Tabela B.16 - Distâncias entre nós com distribuição uniforme no cenário 1 com 7 clientes	94
Tabela B.17 - Distâncias entre nós com distribuição uniforme no cenário 2 com 7 clientes	95
Tabela B.18 - Distâncias entre nós com distribuição uniforme no cenário 3 com 7 clientes	96
Tabela B.19 - Distâncias entre nós com distribuição uniforme no cenário 1 com 9 clientes	97
Tabela B.20 - Distâncias entre nós com distribuição uniforme no cenário 2 com 9 clientes	98
Tabela B.21 - Distâncias entre nós com distribuição uniforme no cenário 3 com 9 clientes	99
Tabela B.22 - Distâncias entre nós com distribuição uniforme no cenário 3 com 9 clientes	100
Tabela B.23 - Distâncias entre nós com distribuição uniforme no cenário 3 com 9 clientes	101
Tabela B.24 - Distâncias entre nós com distribuição uniforme no cenário 3 com 9 clientes	102

Tabela C.1 - Consolidação dos resultados dos experimentos..... 103

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

B2C	Business To Consumer
B2B	Business To Business
EN	Entidades de Negócios
FSTSP	Flying Sidekick Traveling Salesman Problem
ICT	Information and Communication Technology
JIT	Just-In-Time
MIP	Mixed Integer Programming
PCC	Problema de Cobertura do Caixeiro
TSP-D	Traveling Salesman Problem with Drones
PDSTSP	Parallel Drone Schedulling Traveling Salesman Problem
PPMP	Problema de Programação de Máquinas Paralelas
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
TSP	Traveling Salesman Problem

SUMÁRIO

1	Introdução.....	21
1.1	Objetivos	21
1.2	Justificativas.....	22
1.2.1	Crescimento e problemas da <i>last mile delivery</i>	22
1.2.2	Inovação como vantagem competitiva	23
1.2.3	Desenvolvimento de drones e aplicações ao setor logístico.....	23
1.3	Estrutura do trabalho.....	24
2	Literatura relacionada.....	25
2.1	<i>Last mile delivery</i>	25
2.1.1	Desafios	25
2.1.1.1	Demandas.....	25
2.1.1.2	Custos.....	28
2.1.2	Classificação das variáveis envolvidas na <i>last mile delivery</i> e aplicação aos drones	
	29	
2.1.3	Agentes envolvidos	30
2.1.3.1	Comerciantes	31
2.1.3.2	Operadores logísticos.....	31
2.1.3.3	Suporte	32
2.2	Uso de drones.....	32
2.2.1	Automação.....	32
2.2.2	Carga.....	33
2.2.3	Outras especificações	33
2.2.4	Barreiras.....	34
2.3	Caracterização do uso de drones na <i>last mile delivery</i>	35
2.3.1	Classificação.....	35
2.3.1.1	Pagamento.....	35

2.3.1.2	Armazenagem e preparação do pedido	35
2.3.2	Nível de serviço para o cliente	36
2.3.2.1	Distribuição	36
2.3.2.2	Entrega do produto	37
2.3.3	Consolidação dos fatores críticos de sucesso.....	37
2.3.3.1	Eficiência do método.....	37
2.3.3.2	Entrega.....	38
2.3.3.3	Segurança e legalização.....	39
2.4	Problemas de roteamento e programação de drones	39
2.4.1	Entregas com drones como um TSP	39
2.4.2	Entrega com drones como um PPMP	41
3	Delimitação do tema	43
3.1	Definição do contexto	43
3.2	Modelos de entrega em potencial	43
3.2.1	Centro de distribuição centralizado.....	43
3.2.2	Múltiplos centros de partida com centro de distribuição centralizado.....	44
3.2.3	Entrega compartilhada entre drone e caminhão	45
3.3	Escolha do modelo	46
4	Definição do problema.....	49
5	Modelagem matemática	51
5.1	Conjuntos.....	51
5.2	Variáveis de decisão.....	51
5.3	Parâmetros	52
5.4	Função Objetivo	53
5.5	Restrições	53
6	Resultados e discussões	57
6.1	Definição dos experimentos	57

6.1.1	Número e distribuição de clientes	57
6.1.2	Demais parâmetros	58
6.2	Abordagem e <i>softwares</i> usados.....	58
6.3	Resultados	58
6.3.1	Função objetivo e utilização dos drones.....	59
6.3.2	Esforços computacionais	65
7	Conclusões e trabalhos futuros	67
	Referências bibliográficas	69
	Apêndice A – Programação em GAMS	73
	Apêndice B - Cenários gerados	79
	Apêndice C - Base de dados dos resultados	103

1 Introdução

O crescimento do *e-commerce* e a subsequente pressão sobre as operações logísticas, aliado à elevação da exigência do nível de serviço por parte dos clientes, geram uma demanda por soluções inovadoras no processo de entrega de mercadorias. Em um contexto de desenvolvimento da tecnologia de drones, esta emerge como uma possível solução para tornar o processo de entrega mais eficiente, tanto no que diz respeito à redução do tempo de entrega quanto ao seu custo. E, assim, seu estudo passa a ser um tema relevante. Deste modo, o desenvolvimento e a análise de modelos de otimização de rotas se tornam peças fundamentais para estudar um posterior estudo de viabilidade econômica da utilização de drones como veículos responsáveis pelo carregamento de bens para o cliente final.

1.1 Objetivos

O problema a ser resolvido neste trabalho visa sanar a escassez, na literatura, de estudos de problemas de roteamento e programação envolvendo drones como veículo de entrega aplicados a contextos nos quais eles, de fato, têm maior possibilidade de sucesso. Em outras palavras, deseja-se realizar uma definição e aplicação de um modelo de roteamento e programação envolvendo drones que pode ser utilizado como ferramenta para resolução de problemas reais da *last mile delivery* (entrega da última milha, em tradução literal). Para isso, foram definidos dois objetivos para o trabalho:

- Mapeamento do contexto do problema: pretende-se identificar cenários nos quais há viabilidade de introdução da tecnologia de drones como agente redutor dos problemas encontrados, a partir da realização de uma extensiva pesquisa a respeito da situação vigente da *last mile delivery*.
- Aplicação de modelo de otimização: a partir da análise feita, pretende-se aplicar um modelo de roteamento e programação mais adequado, com subsequente análise dos resultados encontrados.

A necessidade de realizar um estudo a respeito do contexto do problema e identificar eventuais oportunidades de inclusão de drones como solução para os problemas da *last mile delivery* está relacionada ao fato de que inovações no modelo de negócio por vezes são mais significativas do que inovações no processo e/ou produto (BCG, 2009).

1.2 Justificativas

Essa seção apresenta os principais fatores que motivaram o autor a desenvolver esse trabalho.

1.2.1 Crescimento e problemas da *last mile delivery*

Entre 2010 e 2016 o crescimento anual de vendas online B2C foi de 23% (ECOMMERCE FOUNDATIONS, 2016), que é justificado não só pela difusão da internet, mas também pela “praticidade” do método, uma vez que permite que o consumidor tenha mais acesso a uma maior variabilidade de produtos (que incluem, inclusive, bens não comercializados localmente), com melhor capacidade comparativa de preços e qualidade e sem a necessidade de locomoção (EHMKE; MATTFELD, 2012).

Segundo relatório da McKinsey (2016), o volume de vendas online é o principal responsável pelo aumento da quantidade de entregas, que pode dobrar nos próximos 10 anos em mercados maduros, ao passo em que em mercados em desenvolvimento esse crescimento tende a ser ainda maior. Essa situação tem desafiado a capacidade logística de muitas empresas, desde varejistas a operadores logísticos, sobretudo o que diz respeito ao trecho final da entrega (WINKENBACH; JANJEVIC, 2017).

Em logística, o termo *last mile delivery* é definido como o transporte de bens do último ponto de distribuição até o destino final, onde o cliente final irá receber-lo, o que pode incluir desde fazendas até grandes prédios de escritórios (LOPEZ, 2017). Apesar da *last mile delivery* normalmente representar uma pequena parcela da distância percorrida pelo produto de seu local de produção até o cliente final, ela representa cerca de 50% dos custos totais de entrega, resultado gerado sobretudo devido às ineficiências inerentes aos métodos utilizados atualmente (MCKINSEY, 2016).

Hoje o método mais comum de entrega é aquele no qual o produto é entregue ao cliente final em sua casa, pessoalmente. Esse método é consideravelmente inflexível e ineficiente tanto de uma perspectiva do cliente, que deve aguardar o produto ser entregue, quanto da companhia responsável pela entrega, que assume o risco de necessitar de uma segunda tentativa de entrega caso o cliente não se encontre em casa no momento da entrega (ZHANG; LEE, 2016). Outros problemas relacionados à *last mile delivery* serão apresentados com maior profundidade no Capítulo 2.

1.2.2 Inovação como vantagem competitiva

Na economia moderna, a competição entre negócios e a busca por vantagens competitivas motivam a emergência de inovações. Em um cenário de ineficiência no processo de entrega, a busca por métodos mais eficientes emerge como um elemento chave para que companhias consigam se destacar e ganhar vantagem entre as demais. Além disso, as fontes das vantagens competitivas podem não vir somente da maximização da produtividade de cada companhia, mas também de uma elevação na eficiência de um sistema suportando a rede das companhias, tal qual seria uma eventual inclusão de uma rede de suporte à tecnologia dos drones no contexto da *last mile delivery* (CAROLI et al. 2010).

Este cenário de crescimento do volume de entregas, aliado às ineficiências do método atual e à necessidade de inovação inerente ao desenvolvimento econômico, tornam necessário um estudo que busca compreender as demandas do problema e verificar uma abordagem de otimização aplicável a ele. Em outras palavras, a *last mile delivery* se torna um processo-chave para companhias obterem vantagens competitivas, e a introdução de drones, aliados a modelos de otimização de rotas robustos e aplicáveis à realidade do problema, podem emergir como uma alternativa viável.

1.2.3 Desenvolvimento de drones e aplicações ao setor logístico

Apesar dos drones serem uma tecnologia relativamente nova, são múltiplas as suas aplicações, que vão desde entretenimento ao uso militar, de modo que as vendas de drones devem superar os US\$12 bilhões em 2021 (D'ONFRO, 2017).

Um estudo da McKinsey (2016) estimou que drones e veículos autônomos serão responsáveis por realizar 80% das entregas de todas as mercadorias. Esse elevado número está relacionado sobretudo ao desenvolvimento da tecnologia, maior aceitação pública e aumento do custo de oportunidade relacionado à elevação dos custos de mão-de-obra. Jeff Bezos, CEO da Amazon, companhia que tem sido uma das principais responsáveis pelo desenvolvimento de testes com drones realizando a *last mile delivery*, afirmou em entrevista que:

“Um dia observar drones da Amazon será tão comum quanto observar caminhões de correio” – Jeff Bezos, CEO, Amazon (WATTLES, 2015)

A realização de trabalhos a respeito do tema se mostra, portanto, cada vez mais pertinente, sobretudo sob a ótica de que o conhecimento acadêmico deve acompanhar o desenvolvimento das tecnologias presentes na sociedade.

1.3 Estrutura do trabalho

Este primeiro capítulo apresentou uma visão geral do trabalho, com os seus principais objetivos e motivações. O restante do trabalho está organizado da seguinte forma:

Capítulo 2 – Literatura relacionada: apresenta uma revisão sobre os conceitos e teorias usados ao longo do trabalho. O capítulo expõe (i) uma perspectiva mais profunda a respeito da *last mile delivery*, incluindo sua caracterização geral, seus principais desafios e agentes envolvidos nela, além de um framework utilizado no auxílio de atribuição de papéis a agentes no contexto logístico; (ii) uma caracterização geral dos drones e como eles podem e já têm sido aplicados no setor logístico de entregas; (iii) apresentação de como problemas de roteamento e programação têm sido aplicados a esta situação.

Capítulo 3 – Delimitação do tema: apresenta situações plausíveis de aplicabilidade dos drones no contexto da *last mile delivery* com base na literatura apresentada.

Capítulo 4 – Definição do problema: apresenta uma descrição geral do problema a ser modelado, assim como as hipóteses assumidas.

Capítulo 5 – Modelagem matemática: apresenta o modelo matemático que será utilizado, expondo a nomenclatura utilizada e definindo e contextualizando os parâmetros, variáveis de decisão e restrições que o compõem.

Capítulo 6 – Resultados e discussões: apresenta as instâncias de teste utilizadas, os resultados obtidos e análises de sensibilidade de alguns dos fatores.

Capítulo 7 – Conclusões e trabalhos futuros: conclui o trabalho e sugere estudos futuros.

2 Literatura relacionada

Neste capítulo são apresentadas as referências utilizadas neste trabalho com o objetivo de construir uma base teórica sólida para análise dos contextos nos quais os drones podem ser incluídos como ferramenta de entrega, levantando tanto características da *last mile delivery* quanto dos drones, assim como trabalhos em problemas de roteamento e programação de veículos que trataram este cenário.

2.1 *Last mile delivery*

Essa seção apresenta um olhar mais aprofundado a respeito da *last mile delivery*, expondo seus principais desafios, os *players* envolvidos e uma metodologia de atribuição de papéis em contextos logísticos.

2.1.1 Desafios

Esta sub-seção apresenta os principais desafios envolvidos na *last mile delivery*. Para fins de simplificação, esses desafios foram divididos em duas categorias: desafios associados às demandas do mercado a da sociedade como um todo, e desafios associados aos seus custos.

2.1.1.1 Demandas

As demandas associadas à *last mile delivery* podem ser relacionadas ao mercado, isto é, aos clientes, ou ao ambiente externo, isto é, à sociedade sob uma perspectiva mais geral.

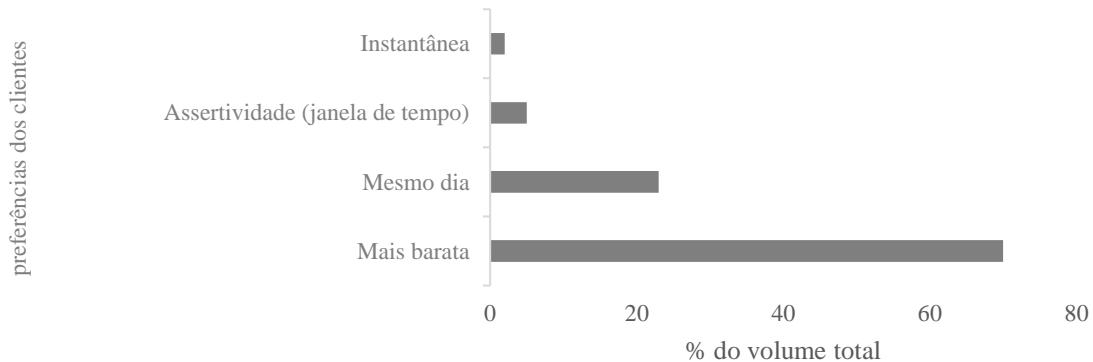
Diante da perspectiva do cliente, as exigências com os parâmetros de entrega estão ficando cada vez mais rígidas, intensificando a necessidade de um processo logístico mais eficiente, sobretudo em sua etapa mais crítica, a *last mile*. As principais críticas dos clientes são (VISSEUR et al., 2014):

- a) produto não entregue;
- b) Altos valores cobrados pelo transporte;
- c) elevado *lead time* (tempo entre produto ser comprado e entregue);
- d) necessidade de esperar em casa.

Neste cenário, clientes esperam não somente alta velocidade e baixos custos da entrega, mas também precisão, uma vez que o tempo gasto esperando o produto é indesejável.

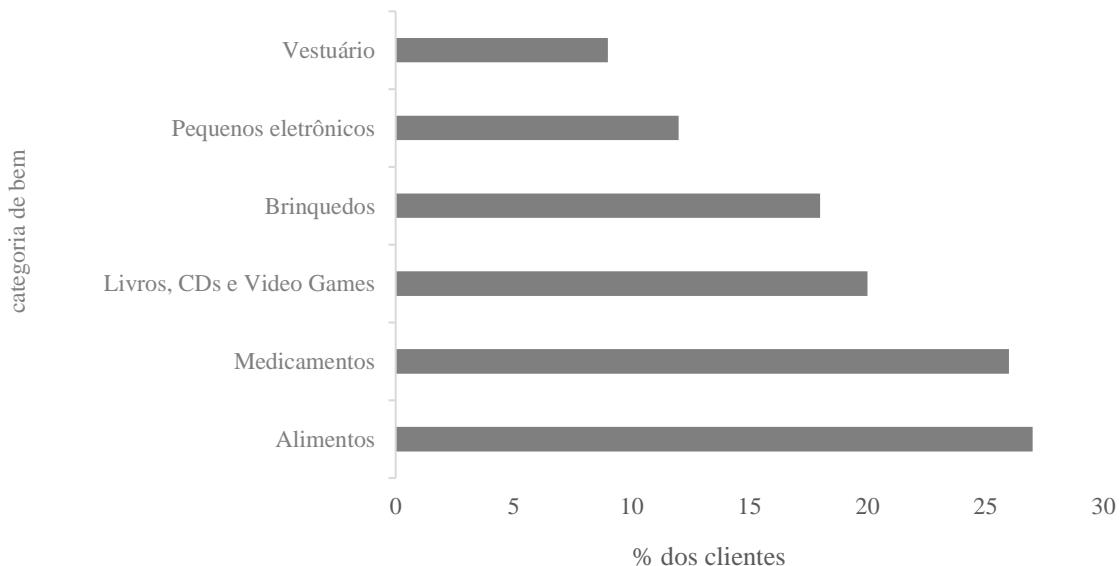
O relatório da McKinsey (2016) apresenta uma pesquisa sobre as exigências de clientes com respeito às opções de entrega, cujos resultados são apresentados nas Figuras 2.1 e 2.2.

Figura 2.1 – Parcota dos clientes escolhendo entre as opções de entrega



Fonte: McKinsey (2016)

Figura 2.2 – Parcota dos clientes que não compraram o produto devido a longos tempos de entrega



Fonte: McKinsey (2016)

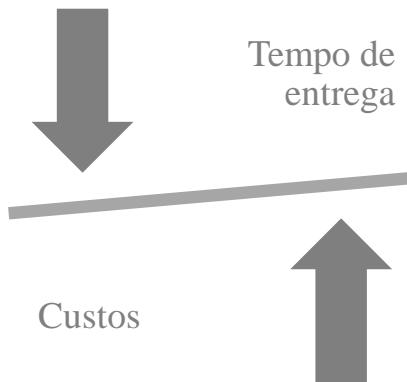
É possível, a partir do relatório e das informações anteriores, apresentar três conclusões relevantes:

- apesar de a grande maioria dos clientes preferirem o método de entrega mais barato, mais de 20% aceitariam pagar um pouco mais para entregas no mesmo dia, ou mesmo instantâneas, número este que é maior entre a parcela mais jovem da sociedade, sugerindo que esse número possui uma tendência de crescimento;

- b) em algumas categorias de produto mais de 25% dos clientes já decidiram não comprar um produto devido a elevados tempo de entrega;
- c) não existe um interesse por parte dos clientes em se locomover para retirar o produto, de modo que entregas domésticas devem dominar o mercado.

De modo geral, segundo DAVIS E MENTZER (2006, apud BOYER et al. 2009), o desafio encontrado entre companhias que operam a *last mile delivery* é saber se posicionar estrategicamente no *trade-off* entre tempo de entrega e custos como apresentado na Figura 2.3, balanceando ganhos de faturamento com custos.

Figura 2.3 – Principal *trade-off* encontrado por operadores logísticos na *last mile delivery*



Fonte: Elaborado pelo autor

Com este cenário em mente, é importante definir o papel dos drones neste *trade-off*. O principal conceito que percorre o uso dessa tecnologia é a diminuição do tempo de entrega, uma vez que drones apresentam maior flexibilidade e agilidade de locomoção. Por outro lado, a inclusão da tecnologia no processo alteraria a estrutura de custos das entregas, de modo que seria necessário realizar uma análise detalhada da viabilidade financeira de realizar esta inclusão, sobretudo em algumas categorias de produtos nas quais os clientes não estariam dispostos a pagar por uma entrega mais ágil. Uma análise mais detalhada acerca dos principais fatores a serem considerados para entender a viabilidade da inclusão de drones na *last mile delivery* será apresentada neste capítulo na Subseção 2.3.

Além das exigências do mercado com respeito à *last mile delivery*, é importante discutir as demandas da sociedade com este processo, uma vez que ele não é relevante somente no escopo logístico, mas também sob uma ótica mais ampla.

A *last mile delivery* apresenta não só desafios econômicos, mas também custos sociais e ambientais, relacionados tanto à poluição quanto ao trânsito gerado pela fragmentação do

transporte e ao mau uso da capacidade disponível dos veículos (IWAN et al. 2016). Na medida em que operadores logísticos e empresas de varejo tentam desenvolver maneiras economicamente viáveis de realizar entregas, o crescimento do número de entregas está associado à elevação do tráfego em áreas urbanas (isto é, a um maior número de veículos em circulação e problemas de estacionamento), e, consequentemente, ao aumento de emissão de gases responsáveis por intensificar o efeito estufa (sobretudo CO₂) e aumento da poluição sonora.

Diante deste cenário, a utilização de drones no processo logístico pode se apresentar como uma alternativa para a redução dessas externalidades negativas, substituindo os tradicionais veículos de entrega de hoje movidos à combustão. Por outro lado, a utilização de drones pode se apresentar como um risco de segurança à população, somado ao fato de que há uma grande utilização de baterias por este tipo de tecnologia, que potencialmente afetam de forma negativa o meio ambiente.

2.1.1.2 Custos

Esta Subseção apresenta os principais desafios relacionados aos custos da *last mile delivery*, apresentando os principais fatores que levam esta a ser a parte da cadeia logística mais ineficiente do ponto de vista financeiro.

Como já mencionado no Capítulo 1, um dos principais fatores que levam a *last mile delivery* a ser um segmento logístico ineficiente é a alta demanda por mão-de-obra, de modo que estes dominam o custo por quilômetro para entregas diretas ao consumidor final (BOYER et al. 2009). O custo com mão-de-obra é o principal fator que desafia as atuais companhias de operação logística (MCKINSEY, 2016), associado principalmente aos seguintes fatores (DE SOUZA et al. 2014):

- a) elevada dispersão dos pontos de entrega sobre áreas de acesso restrito, como centros urbanos ou zonas rurais de difícil acesso, resultando em uma necessidade de maior oferta de mão-de-obra para entregar o mesmo número de itens;
- b) restrição horária de entrega (sobretudo pela necessidade de recepção pessoal dos itens), o que contribui para um mau uso da mão-de-obra disponível.

A tecnologia de drones pode representar uma solução interessante na *last mile delivery* no sentido de substituição de mão-de-obra, uma vez que seu controle pode ser feito remotamente e, como será apresentado na Seção 2.2, o veículo apresenta um elevado potencial de autonomia.

Além dos custos de mão de obra, a grande quantidade de desperdícios presentes atualmente na *last mile delivery* é um fator responsável pelo seu custo desproporcional. Segundo Ohno (1988), a utilização ao maior nível possível dos ativos de uma companhia é o principal responsável pela redução de desperdícios, o que gera, simultaneamente, maximização da produtividade e manutenção do nível de satisfação dos clientes. Diante disso, é possível mencionar algumas situações nas quais desperdícios presentes na *last mile delivery* são flagrantes (BHUSIRI et al. 2014):

- a) subutilização de recursos de mão de obra (como observado no item anterior);
- b) subutilização da capacidade dos veículos de transporte;
- c) danificação de bens;
- d) entregas repetidas e/ou falhas, que representam, respectivamente, 12% e 2% do total de entregas (VISSER et al. 2014).

Nesse cenário, a emergência de alternativas de transporte é extremamente relevante, como drones (TAVANA et al. 2017), sobretudo quando se considera que poderão reduzir o número de falhas nas entregas e melhorar a utilização de recursos de capacidade e de mão de obra.

Por outro lado, é necessário atentar para novos desperdícios que poderão surgir devido à emergência de drones, tais como a perda ou danificação de produtos.

2.1.2 Classificação das variáveis envolvidas na *last mile delivery* e aplicação aos drones

A fim de que se possa ter um olhar mais aprofundado a respeito da *last mile delivery*, facilitando a identificação de oportunidades de introdução de drones no processo, foi feita uma análise sobre as principais variáveis atuantes sobre ela.

Variáveis que influenciam a *last mile delivery* é um tema explorado profundamente na literatura (BOYER et al. 2004; GEVAERS et al. 2014; HAYASHI et al. 2014). De forma sintética, Winkenbach e Janjevic (2017) verificaram que seria possível agrupá-las em 5 categorias principais, as quais são apresentadas na Tabela 2.1 a seguir, acompanhadas de cada um dos parâmetros que se incluem na categoria.

Tabela 2.1 – Variáveis do processo de entrega

Pagamento
Local do pedido
Momento do pagamento
Meio de pagamento
Armazenagem e preparação do pedido
Governança do armazenamento
Tecnologia envolvida na preparação da ordem
Local da preparação da ordem
Nível de serviço para o cliente
Tempo de entrega
Janela de tempo
Serviços na entrega
Distribuição
Organização da rota
Armazenamento intermediário
Modo e veículo utilizado no transporte intermediário
Modo e veículo utilizado na última milha
Governança do transporte intermediário
Governança do armazenamento intermediário
Governança do transporte da última milha
Entrega do produto
Local de entrega
Meio de entrega

Fonte: Adaptado de Winkenbach e Janjevic (2017)

Na Seção 2.2 deste capítulo esta classificação será analisada mais profundamente e aplicada ao contexto dos drones.

2.1.3 Agentes envolvidos

A fim de compreender melhor o processo e o contexto da *last mile delivery* foi realizada uma análise dos principais agentes envolvidos nele.

Nos últimos anos o ambiente da *last mile delivery* vem se fragmentando devido à entrada de novos *players*, ao mesmo tempo em que companhias estão se tornando mais colaborativas e construindo parcerias para que sejam atingidos novos níveis de eficiência, criando uma rede mais complexa de agentes (PWC, 2016). De modo geral, é possível classificar os agentes em

três grupos e determinar como, em seus respectivos contextos, eles atuam para atingir seus objetivos.

2.1.3.1 Comerciantes

Comerciantes são os varejistas ou os fornecedores que são os responsáveis não só por receber a ordem de compra do consumidor (como uma compra *online*), mas também por garantir que os itens a serem entregues estão disponíveis ao operador logístico.

Apesar de muitas vezes o processo logístico estar fora do *core business* do comerciante, o transporte do produto pode ser visto como a conexão entre a ordem de compra e a entrega final ao cliente (ESPER et al. 2003), tornando-se um fator chave de sucesso para garantir a viabilidade do negócio e fonte de vantagem competitiva, sobretudo porque, como observado anteriormente, entregas precisas e rápidas são interpretadas como valor ao cliente (McKinsey, 2016). Ainda, segundo Sandberg et al. (2011), a excelência logística permite um progresso estratégico e cumpre um papel importante na companhia em termos de crescimento e lucratividade.

Neste cenário, a *last mile delivery* tem um papel decisivo para o comerciante não só porque representa relativamente os maiores custos da entrega, mas também porque é a interface entre a companhia e o cliente. Contudo, apesar da importância, comerciantes não são responsáveis normalmente pela entrega de seus produtos, seja por não apresentarem escala para tal ou por não integrar parte da expertise da empresa, de modo que esta tarefa é usualmente terceirizada (Bain, 2012).

2.1.3.2 Operadores logísticos

A mudança na perspectiva das companhias de observarem o processo logístico como meramente um custo adicional para um potencial elevador do valor do produto e uma fonte de vantagem competitiva (MENTZER et al. 2014), abriu caminho para um crescimento significativo de operadores logísticos (BAIN, 2012).

Os operadores logísticos são os responsáveis pela organização de toda cadeira de entrega, que vai desde o momento em que a mercadoria deixa seu local de produção até o cliente final. Este trajeto pode incluir armazéns, centros de consolidação e distribuição e meios de transporte (de automóveis a, eventualmente, drones).

Os comerciantes, ou mesmo outros operadores logísticos, usualmente subcontratam operadores logísticos para realizar suas atividades, cuja proposição de valor se sustenta em três principais pilares (BAIN, 2012):

- a) otimização de custos logísticos para seus clientes;
- b) encurtamento da duração do ciclo de entrega;
- c) redução de ativos não circulantes.

O maior desafio para operadores logísticos é o alinhamento de suas posições estratégicas com os modelos organizacionais, de modo a garantir o encontro com os corretos segmentos de clientes (BAIN, 2012). Em outras palavras, os líderes no ramo da operação logística são aqueles que conseguem obter vantagens competitivas por meio da compreensão da necessidade e comportamento de seus clientes, identificando a melhor oportunidade dentro do trade-off apresentado na figura 2.3 e apresentando capacidade de gerenciamento da cadeia de suprimentos que, simultaneamente, vão de encontro a essas necessidades e são difíceis de imitar (SANDBERG et al. 2011; KETCHEN; GIUNIPERO, 2004; BARNEY; CLARK, 2007; OLAVARRIETA; ELLINGER, 1997).

2.1.3.3 Suporte

Os agentes de suporte à operação logística são aqueles que não atuam diretamente na produção, estoque ou transporte de bens, mas que são essenciais para essas atividades ocorrerem, providenciando uma estrutura adequada para o fluxo de produtos e informação. Exemplos de segmentos de suporte ao processo logístico de entrega de bens são: locadoras de veículos, companhias especializadas em ICT (*Information and Communication Technology*) e até mesmo governos locais.

2.2 Uso de drones

Esta seção apresenta algumas especificações técnicas a respeito de drones usados como veículos de entregas para que se possa identificar as suas potencialidades e restrições.

2.2.1 Automação

O termo “drone” diz respeito a qualquer nave não pilotada que normalmente recebe o nome técnico de *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV), podendo se encaixar em todos os níveis de automação definidos pela “US SAE standard J3016” (HOWELL, 2015). A principal vantagem na utilização de veículos autônomos é a liberação dos humanos dos perigos e do estresse de

dirigir (Mitrea e Kyamakya, 2016), além de potenciais ganhos econômicos pela minimização de desperdícios, como discutido visto anteriormente.

Dentro do contexto de entregas, drones devem apresentar alto nível de automação, o que significa não exigir monitoramento constante por um sistema ou humano (SCHREURS; STEUWER, 2015), permitindo que uma pessoa controle múltiplos drones simultaneamente (WANG, 2016). Apesar de existirem restrições legais com respeito à propção de drones por controlador, é razoável assumir que cada controlador possa ser responsável por 8 a 12 drones (STANFORD, 2016).

2.2.2 Carga

Drones que já foram testados em sistemas de entrega foram aptos a carregar aproximadamente 2,5kg. Apesar de parecer um peso pequeno, a Amazon afirma que cerca de 80% de todos os seus pacotes se encaixam nesta restrição (WANG, 2016), o que demonstra que de fato pode se tornar um investimento interessante de uma perspectiva econômica.

2.2.3 Outras especificações

As empresas norte-americanas Amazon e Matternet são algumas das quais já realizaram testes usando drones como veículo para entregas. Seus veículos, apresentados nas Figuras 2.5 e 2.6 a seguir, são elétricos, pesam cerca de 20 kg e possuem baterias que os permitem viajar aproximadamente 20 km, a uma altura de 100 m, com velocidades que variam entre 40 km/h e 80km/h (MCCOLLON, 2017; ONG, 2017).

Figura 2.4 – Modelo de drone *Amazon Prime Air*



Fonte: Donahoe (2015)

Figura 2.5 – Modelo de drone *Matternet*



Fonte: McGlaun (2017)

2.2.4 Barreiras

As principais barreiras existentes para a difusão de drones como veículos de entrega são relacionadas a sua regularização e aceitação pública.

Em termos legais, a fim de evitar o sobrevoo sobre propriedades privadas e garantir segurança às pessoas, normas rígidas vêm sido criadas limitando o uso de drones (DONAHOE, 2015; GOUNLEY, 2015). Essas regras se referem às áreas nas quais os drones podem ser utilizados e a proporção entre o número de drones e seus operadores (STANFORD, 2016). Por outro lado, algumas regulamentações têm evoluído no sentido de permitir cada vez mais a utilização de drones para fins comerciais (STANFORD, 2016), sobretudo em áreas rurais (MCKINSEY, 2016).

Em entrevista, Jeff Bezos, afirmou inclusive que o maior obstáculo para a expensão da utilização de drones como veículos de entrega não está relacionada à tecnologia envolvida, mas sim o setor regulatório (D'ONFRO, 2014).

Por outro lado, outro obstáculo relevante no que tange a utilização de drones é a questão da aceitação pública. Naturalmente, inovações que afetam a rotina das pessoas tendem a enfrentar uma rejeição inicial, sobretudo no que diz respeito à substituição de um método de entrega pessoal, como acontece hoje.

Entretanto, pesquisas (MCKINSEY, 2016) têm mostrado que a aceitação pública já tem começado a mudar, especialmente entre os mais jovens, que são mais abertos às inovações tecnológicas, e que, na prática, representam a tendência de aceitação para os próximos anos.

2.3 Caracterização do uso de drones na *last mile delivery*

Esta Seção tem como objetivo aplicar os conceitos abordados anteriormente, sobretudo no que diz respeito às características da *last mile delivery* e dos drones, a fim de entender a aplicabilidade do último na primeira.

Primeiramente, a classificação geral apresentada na Subseção 2.1.2 será aplicada ao contexto do trabalho em questão, de modo a trazer uma visão da operacionalização do problema em discussão. A seguir, com base nas informações adquiridas, será feita uma apresentação consolidada dos fatores críticos de sucesso para a viabilidade dos drones como veículos de entrega. Por fim, será exposto o modelo de entrega que se apresenta mais promissor a partir das discussões levantadas e do *framework* apresentado na Subseção 2.1.4.

2.3.1 Classificação

Esta Subseção aplica o modelo de classificação apresentado na tabela 2.1 ao contexto da *last mile delivery* com drones, baseando-se sobretudo nas premissas utilizadas neste capítulo até agora, tanto no que diz respeito ao contexto da *last mile delivery* quanto às oportunidades e restrições do drone, de modo a evidenciar seu modo de operacionalização.

2.3.1.1 Pagamento

Tendo em vista a questão da aceitação pública e a opção de que drones façam entregas sem a necessidade de uma recepção assistida, para este trabalho serão consideradas somente situações “usuais” de pagamento em situações de vendas *online*, isto é, o procedimento de pagamento dissociado da entrega final do produto.

2.3.1.2 Armazenagem e preparação do pedido

Essas variáveis envolvidas no processo logístico de entrega dizem respeito ao local de estoque dos produtos e a preparação do pedido assim que um pedido de compra é realizado. Essas variáveis não serão analisadas profundamente, uma vez que o objetivo principal deste trabalho é promover uma discussão a respeito do efetivo processo de entrega. Entretanto, é importante mencionar o fato de que um dos principais objetivos da inclusão dos drones na *last mile delivery* é redução de custos e tempo de entrega, o que naturalmente demanda um sistema eficiente de abastecimento, armazenamento e preparação do pedido.

De modo geral, o que pode se descrever da operacionalização desta etapa é a composição de dois processos:

- a) o pedido é feito pelo cliente e processado no centro de distribuição correspondente, onde os drones estão armazenados;
- b) os produtos do pedido são selecionados e o drone os coleta dentro do próprio centro de distribuição ou, eventualmente, a partir de um outro veículo (caminhão) que é responsável por “armazenar” os drones e os pedidos.

2.3.2 Nível de serviço para o cliente

Como visto previamente, uma das principais demandas existentes por parte dos clientes com respeito às entregas de mercadorias é a maior agilidade e precisão. Ainda, como também foi visto no capítulo anterior, uma das principais vantagens na utilização de drones seria a possibilidade de realizar entregas não presenciais.

Neste cenário, portanto, faz sentido discutir um nível de serviço com encurtamento do tempo de entrega, mas sem necessariamente envolver janelas de tempo restritas.

Ainda, naturalmente, não serão trabalhadas hipóteses de execução de serviços durante a entrega (como troca de produtos).

2.3.2.1 Distribuição

As variáveis relacionadas à distribuição dos produtos dizem respeito àquelas relacionadas a todo o processo de movimentação dos mercadorias, de seu armazém inicial até o cliente final, com foco evidente na *last mile delivery*. No entanto, é preciso ter em mente que, para que o modelo de utilização de drones cumpra com seus objetivos no que tange à otimização do processo de entrega, é fundamental que haja um suporte das “fases” iniciais do processo do logístico, garantindo que o produto esteja disponível no centro de distribuição final em tempo hábil para que a entrega ocorra no tempo prometido.

Assumindo-se que caminhões e drones são os únicos possíveis veículos responsáveis por percorrer o último trecho da entrega, é possível definir que (i) os dois podem operar “simultaneamente”, isto é, o caminhão “carregando” o drone que, por sua vez, decola a partir dele em direção ao cliente e, tendo entregue o produto, retorna ao caminhão (onde é recarregado) ou; (ii) há independência entre um e outro, isto é, um ou mais drones decolam do centro de distribuição e retornam exclusivamente a ele (onde são recarregados), ao passo que o caminhão percorre uma rota independente.

Em ambos cenários os caminhões e os drones partem inicialmente do centro de distribuição e, após o atendimento de todos os clientes, a ele retornam.

2.3.2.2 Entrega do produto

As variáveis relacionadas à entrega do produto representam a interface com o cliente final, no que tange tanto ao local quanto ao meio. Como observado na Subseção 2.1.1, entregas diretas ao consumidor final tendem a dominar o cenário da *last mile delivery*. Para o caso dos drones, esse entrega é feita em um modelo no qual o drone pousa em local determinado por meio de um sistema de reconhecimento de imagem e/ou controle manual, sem necessidade de presença física do cliente.

Entretanto, é necessário se aprofundar no que diz respeito ao processo de entrega. Uma barreira muito relevante para o sucesso da operação diz respeito ao modelo de recepção das mercadorias em situações nas quais o local de entrega não apresenta uma área específica para pouso, como um quintal, jardim ou terraço, ou, ainda, cujas áreas nas quais o pouso é possível são compartilhadas por vários moradores (como edifícios).

2.3.3 Consolidação dos fatores críticos de sucesso

Esta Subseção sintetiza o estudo realizado neste capítulo até então, expondo os principais fatores críticos para o sucesso da inserção de drones como veículos de entrega no contexto da *last mile delivery*.

2.3.3.1 Eficiência do método

O processo de entrega com drones como descrito anteriormente neste capítulo pode ser visto como ineficiente (WANG, 2016), uma vez que tanto a densidade da rota (número de descarregamentos feitos na rota) quanto o volume do descarregamento são iguais a um. Em outras palavras, o drone carrega e entrega somente um pedido a cada viagem. Por outro lado, estudos (BENJAMIN, 1990; CHANG; CHOU, 2012; CHANG et al. 2009; STORHAGEN; HELLBERG, 1987) discutem que, muitas vezes, entregas pequenas, mas frequentes, como é o caso, atendem mais princípios de *Just-In-Time* (JIT) do que grandes entregas independentes.

Para avaliar a eficiência da utilização de drones na *last mile delivery* é fundamental que se faça uma análise financeira comparando os potenciais ganhos econômicos em comparação com as perdas. A seguir são descritas as situações que possibilitam um ganho econômico com a utilização de drones no contexto em questão:

- a) economias de custos de custos de mão de obra, uma vez que parte dos clientes não precisariam de atendimento “humano”;
- b) rota linear e com velocidade constante, ganho relevante em áreas de difícil acesso ou com elevado trânsito de veículos;
- c) redução de custos com os atuais veículos (manutenção, aluguel, gasolina, etc.);
- d) redução da necessidade de entregas repetidas (uma vez que com os drones não há necessidade de interação);
- e) possibilidade de elevação do *ticket médio* por entregas mais rápidas.

Por outro lado, é importante destacar situações que poderiam demandar novos (ou elevação de) gastos em comparação ao modelo atual:

- a) compra, manutenção e/ou aluguel dos drones;
- b) gasto com pessoal de controle dos drones;
- c) gastos com infraestrutura para introdução da tecnologia;
- d) gastos com treinamento de clientes e funcionários para operação do novo modelo.

Este trabalho não pretende realizar essa análise complexa dos *trade-offs* financeiros deste novo modelo, entretanto tem como objetivo entender os cenários nos quais ele se apresenta como promissor.

Neste sentido, o relatório da McKinsey (2016) afirma que em áreas rurais, considerando o modelo atual de entrega, é muito custoso para as empresas oferecerem entregas no mesmo dia, devido tanto às grandes distâncias quanto à dificuldade de acesso, fatores que contribuem para a ineficiência da rota. Assim, entregas com drones emergem como uma solução em potencial para a situação.

Por outro lado, é questionável a relevância do mercado rural para justificar o investimento na introdução de uma nova tecnologia. Entretanto, de acordo com a McKinsey (2016), esse mercado representa 13% do número total de entregas, o equivalente a meio bilhão de itens entregues em 2015, o que definitivamente não é um segmento negligenciável.

2.3.3.2 *Entrega*

Como discutido na Subseção 2.3.2.2, uma alteração relevante na operação logística da *last mile delivery* com a inclusão dos drones é o procedimento de entrega efetiva ao cliente, isto é, a interface drone-consumidor.

O desafio desta etapa do processo diz respeito ao local de pouso e entrega do produto, uma vez que os drones atuais precisam de algo em torno de 2 m² (McKinsey, 2016) para conseguirem efetuar a entrega do item ao cliente. É evidente que este tipo de entrega é inviável em contextos urbanos como edifícios ou casas com pequenos espaços para aterrissagem. Ainda, em locais mais adensados, o risco de furto de mercadorias “abandonadas” é maior, o que contribui para a hipótese de inviabilidade do meio urbano nesse processo.

Por outro lado, no contexto rural além de ser mais fácil encontrar locais “pousáveis”, o risco de deixar pacotes sem supervisão é menor (BOYER et al. 2009).

2.3.3.3 Segurança e legalização

Como visto no primeiro capítulo, a legalização do uso de drones é uma das principais barreiras para a aplicação da tecnologia no contexto de entrega.

A principal barreira para legalização do uso dos drones diz respeito à segurança dos pedestres. Naturalmente, este risco é maior no contexto urbano, uma vez que não só há maior adensamento populacional como também maiores riscos de conflito com o tráfego aéreo. Por este motivo normais legais já estão ficando menos rígidas no ambiente rural (McKinsey, 2016).

2.4 Problemas de roteamento e programação de drones

Nos últimos anos, com a emergência dos drones, surgiram na literatura múltiplos trabalhos tratando problemas de otimização de rotas envolvendo essa nova tecnologia. Esta seção pretende apresentar algumas dessas variantes, destacando aquela que será utilizada neste trabalho.

É possível agrupar os trabalhos que abordam problemas aplicáveis à entrega com drones em dois grupos, os quais:

- a) abordam o problema como um *Travelling Salesman Problem* (TSP), visando à minimização do custo ou tempo total da rota;
- b) abordam o problema como um Problema de Programação de Máquinas Paralelas (PPMP).

2.4.1 Entregas com drones como um TSP

A origem histórica do TSP não é exatamente clara, mas, desde a apresentação de um algoritmo de resolução por Dantzig et al. (1954), muitas variantes para o problema foram apresentadas,

assim como métodos heurísticos para sua resolução. Foram encontrados na literatura trabalhos que tratam do TSP com drones, os quais são apresentados a seguir.

Agatz et al. (2016) trabalhou com uma variante TSP com Drones (TSP-D), que trata de um problema no qual um único caminhão carrega um único drone, partindo de um centro de distribuição e retornando a ele ao final. Nele, uma lista de clientes deve ser atendida seja por um drone, pelo caminhão ou por ambos, sabendo que o drone só pode carregar um produto por vez e que sofre de restrições de distância percorrida. Este problema se relaciona ao Problema de Cobertura do Caixeiro (PCC) (Current e Schilling, 1989), que visa determinar a menor rota de uma série de nós de modo que os nós que não se encontram nessa sequência devem estar a uma distância limitada dos nós presentes na rota. Para o problema TSP-D, Agatz et al. (2016) gerou uma formulação de programação inteira para a qual foram aplicados algoritmos heurísticos de solução, e teve como função objetivo a minimização do custo total do trajeto.

Por outro lado, Murray e Chu (2015) discutiram uma variante semelhante a de Agatz et al. (2016), na qual a função objetivo é a minimização do tempo de execução do trajeto. A essa variante atribuíram o nome de *Flying Sidekick Travel Salesman Problem* (FSTSP). No problema, uma série de clientes deve ser atendida, seja por drone ou por caminhão, de modo que o drone pode partir do centro de distribuição ou do caminhão, retornando a ele exclusivamente em nós (clientes ou centro de distribuição), respeitando o tempo de vôo máximo e considerando que alguns clientes não podem ser atendidos por drones. A variante FSTSP também foi abordada por Ha et al. (2018), que incluiu uma variável de “penalização” pelo tempo de espera do drone até a chegada do caminhão (ou vice-versa) em determinado nó, e utilizou como abordagem de solução a meta-heurística GRASP.

O trabalho de Murray e Chu (2015) também desenvolve um modelo de programação de drones no qual um drone e um caminhão atuam paralelamente, o *Parallel Drone Schedulling Traveling Salesman Problem* (PDSTSP), distinguindo-se do modelo descrito anteriormente no fato de que os drones agora devem exclusivamente partir do e retornar para o centro de distribuição. Este modelo também visa a minimização do tempo total de entrega, isto é, a minimização do horário de retorno do drone ou do caminhão ao centro de distribuição.

Por fim, Chang e Lee (2018), por sua vez, propuseram um problema de “clusterização”. Nele, um caminhão sai do centro de distribuição e “estaciona” em cada cluster definido, do qual partem múltiplos drones, que voam em direção ao cliente final, e retornam à posição do caminhão. O modelo proposto é dividido em três etapas: (i) a clusterização, isto é, a definição

das posições de parada, que é feita baseada na técnica de clusterização de K-médias (MacQueen, 1967); (ii) a definição da melhor rota do caminhão entre os pontos de parada, utilizando o modelo de Dantzig et al. (1954); e (iii) a minimização do tempo total ajustando o posicionamento das paradas (via aproximação do centro de distribuição). As três etapas são modeladas via sistemas não lineares de equações.

2.4.2 Entrega com drones como um PPMP

O problema de entregas com drones também pode ser modelado fazendo uso do conceito de máquinas paralelas, como no trabalho de Yu e Hung (2016), que compara três modelos de programação inteira mista visando a minimização do atraso e adiantamento totais (*lateness* e *earliness*), que pode ser aplicado no contexto de drones supondo janelas de entrega em um sistema composto por um centro de distribuição do qual partem múltiplos drones em direção aos clientes, sem a existência de caminhões.

Entretanto, não foram encontrados, na literatura, PPMP a drones.

3 Delimitação do tema

Este Capítulo tem como objetivo definir o contexto viável para a inclusão dos drones, assim como apresentar potenciais modelos de entrega e definir aquele que apresenta o maior potencial de sucesso, levando em consideração os pontos levantados no Capítulo 2.

3.1 Definição do contexto

A partir da Subseção 2.3.3 ficam evidentes as vantagens da utilização dos drones no meio rural, desde questões legais e de segurança até a oportunidade de ganho econômico ao atender um segmento (clientes com interesse em entregas no mesmo dia) que hoje não tem sua demanda satisfeita. As principais desvantagens dizem respeito à velocidade relativa do drone com caminhão (se comparada à oportunidade de ganho em meios urbanos) e autonomia (que pode ser crítica considerando as grandes distâncias a serem percorridas no meio rural).

Balanceando-se as oportunidades, define-se para escopo deste trabalho a restrição ao ambiente rural para utilização de drones.

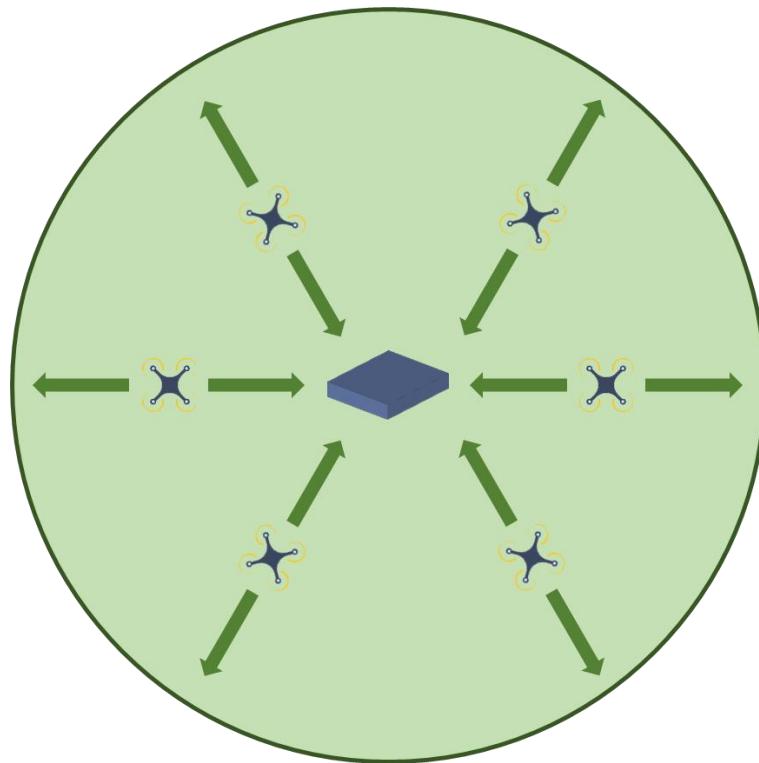
3.2 Modelos de entrega em potencial

A fim de entender as possibilidades de modelos de otimização que poderiam ser usados para resolver o problema de entrega com drones, foram elaborados três cenários viáveis de entrega, todos aplicáveis ao ambiente rural como definido previamente, os quais são ilustrados a seguir.

3.2.1 Centro de distribuição centralizado

O centro de distribuição centralizado é o mais “simples” quando se associa *last mile delivery* com drones. Constitui, basicamente, em um centro de distribuição responsável pelo estoque das mercadorias a serem entregues, do qual, depois da preparação dos pedidos, partem os drones carregando os pacotes em direção aos clientes, retornando cada qual ao mesmo centro. Uma ilustração da operação desse modelo é apresentada na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Ilustração do modelo de “centro de distribuição centralizado”



Fonte: Elaborado pelo autor

A principal vantagem desse modelo é a redução do tempo de entrega, uma vez que, caso o produto já se encontre em estoque e existam drones desocupados, o tempo de entrega será basicamente a soma da preparação do pedido e do tempo de vôo do drone até o cliente, e não consideraria mais as ineficiências da rota do caminhão, que deve passar por múltiplos clientes. Em uma situação hipotética, mas realística, na qual o tempo de preparação é de 15 minutos, o cliente se encontra a 10 km de distância do centro de distribuição e o drone voa a 40 km/h, bastariam 30 minutos para a mercadoria ser entregue ao cliente final.

Por outro lado, esse modelo apresenta uma grande desvantagem quando se atribui ao contexto rural, que é a extensão da área atendida. Uma vez que a autonomia do drone é pequena quando comparada às distâncias demandadas entre clientes em um meio rural, esse pode vir a ser um fator limitante para a viabilidade desse modelo.

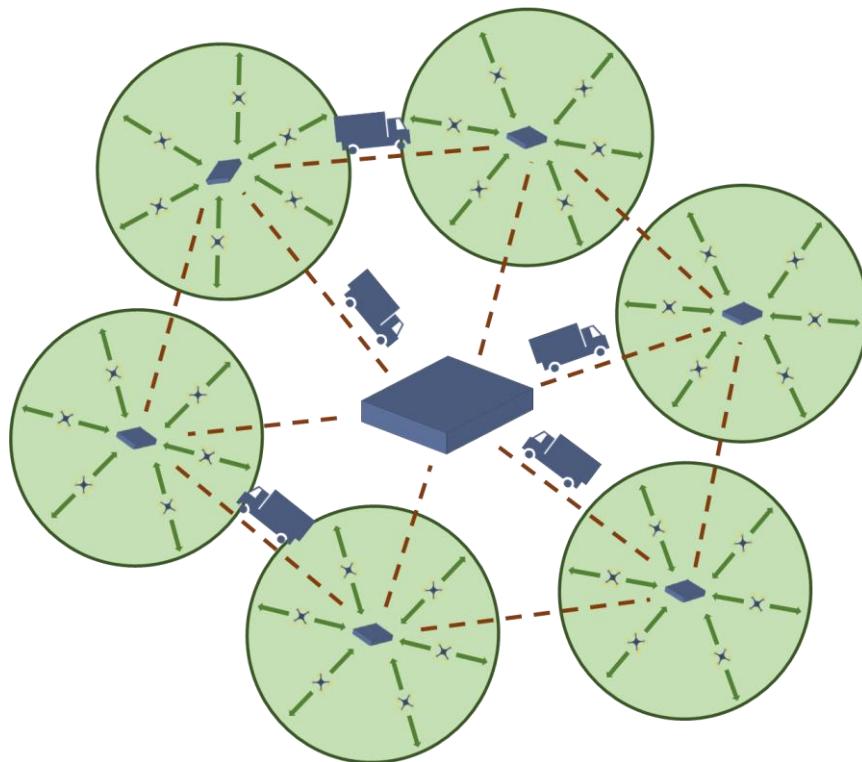
Este cenário poderia ser modelado matematicamente segundo o PPMP.

3.2.2 Múltiplos centros de partida com centro de distribuição centralizado

Outro modelo seria o de “múltiplos centros de partida com centro de distribuição centralizado”, similar ao anterior no que diz respeito à operação do drone sob a ótica de que o mesmo parte

de um local definido e a ele retorna. No entanto, a grande diferença se refere ao fato de que este ponto de partida não é o centro de distribuição, mas sim um local intermediário (neste trabalho chamado de “centro de partida”). Neste modelo, o pacote, após preparado, é levado de caminhão do centro de distribuição até este centro de partida, onde é coletado por um drone, que segue em direção ao cliente e retorna ao mesmo centro de partida. Uma ilustração apresentando a operacionalização do modelo é apresentada na Figura 3.2.

Figura 3.2 – Ilustração do modelo de “múltiplos centros de partida com centro de distribuição centralizado”



Fonte: Elaborado pelo autor

A principal vantagem desse modelo é o atendimento a uma área expandida, com uma melhor utilização dos caminhões, uma vez que não há necessidade de paradas em cada cliente, podendo descarregar vários pacotes em uma só localidade. Por outro lado, há um maior tempo para entrega dos produtos quando comparado ao modelo de centro de distribuição centralizada.

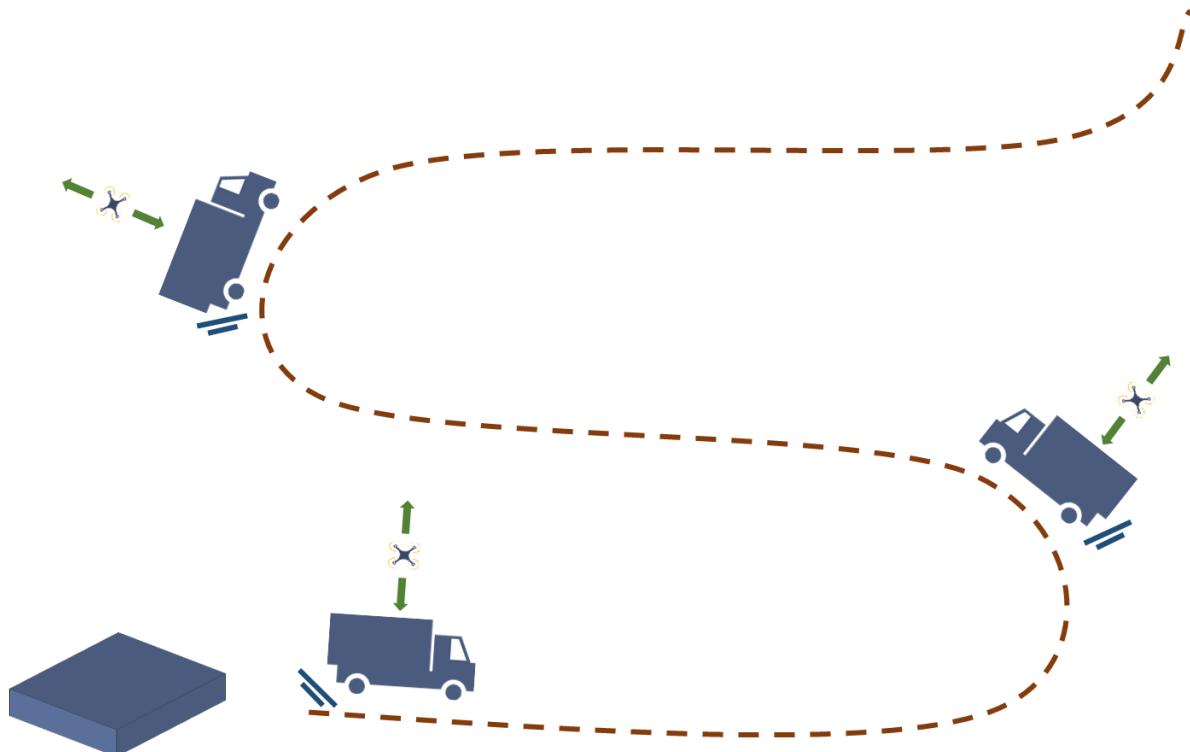
Este cenário poderia ser modelado matematicamente segundo o PDSTSP.

3.2.3 Entrega compartilhada entre drone e caminhão

O terceiro e último modelo é o de “entrega compartilhada entre drone e caminhão” e consiste em um centro de distribuição do qual parte um caminhão carregando os pacotes a serem entregues e um ou mais drones. Assim, drone e caminhão realizam entregas independentes um

do outro, com a única restrição de que o drone deve partir do caminhão e a ele retornar para que consiga coletar outro pacote a ser entregue. Uma ilustração da operacionalização do modelo é apresentada na Figura 3.3.

Figura 3.3 – Ilustração do modelo de “entrega compartilhada entre drone e caminhão”



Fonte: Elaborado pelo autor

A vantagem desse modelo é permitir que o drone faça entregas somente àqueles clientes que de fato se apresentam como vantajosos (seja pela distância ou pela acessibilidade), além de permitir o atendimento a uma área muito expressiva, uma vez que os caminhões não precisam realizar paradas para esperarem o drone. Por outro lado, apesar de possibilitar entregas no mesmo dia, terá um tempo de entrega maior do que o primeiro modelo apresentado.

Este cenário poderia ser modelado matematicamente segundo o FSTSP.

3.3 Escolha do modelo

Considerando a escolha do modelo na Subseção 2.3.4.2, o modelo abordado por Murray e Chu (2015) do FSTSP foi definido para ser utilizado neste trabalho, uma vez que se assemelha ao modelo proposto de entrega compartilhada entre drone e caminhão e tem como função objetivo a minimização do tempo total de trajeto.

Considerando todos os aspectos levantados, e levando em consideração que este último modelo se apresenta como o mais promissor por melhor atender à demanda de entregas em áreas rurais, fica definido este como o modelo a ser colocado em teste para um modelo de otimização, que será descrito com maior detalhe no Capítulo 4.

4 Definição do problema

Este breve capítulo apresenta uma definição mais detalhada do FSTSP abordado no trabalho de Murray e Chu (2015), que será modelado matematicamente via programação linear inteira mista (MIP).

O problema trata de um caminhão que parte de um centro de distribuição munido de um ou mais pacotes e somente um drone. Estes pacotes devem ser entregues a um grupo de clientes entre o momento de partida do caminhão do centro de distribuição e seu retorno a ele. Os pacotes podem ser entregues, para cada cliente, pelo caminhão ou pelo drone. No caso de entrega pelo drone, este deve partir de um cliente ou do centro de distribuição levando um único pacote, realizar a entrega a um cliente e por fim retornar a um outro cliente ou o centro de distribuição. O drone pode única e exclusivamente partir de e retornar para o caminhão ou centro de distribuição. Ou seja, o drone somente pode partir de um cliente caso esteja junto ao caminhão neste cliente e poderá retornar a um cliente no qual o caminhão esteja ou chegará (isto é, o caminhão pode “aguardar” a chegada do drone em determinado cliente ou vice-versa).

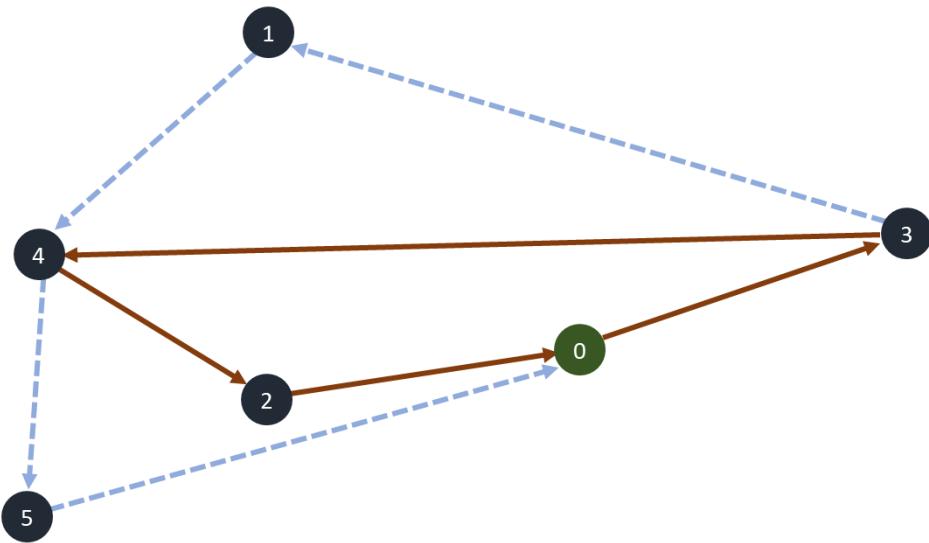
Antes de cada partida do drone existe um tempo relacionado à seleção do pacote correto, sua entrega ao drone e a preparação deste antes que inicie seu vôo. Similarmente, no retorno ao caminhão, considera-se um tempo de recepção do drone, vinculado à troca de bateria e à alocação do drone em local adequado. Supõe-se que não haja um tempo relacionado à entrega do produto ao cliente, tanto para o caminhão quanto para o drone, isto é, é um processo modelado como instantâneo.

O drone possui uma autonomia de vôo, e supõe-se que o tempo para lançamento do drone leva em consideração a troca de baterias, de modo que a nova bateria estará sempre carregada ao máximo, permitindo ao drone percorrer um trajeto de tamanho igual ou menor ao de sua autonomia, e que há estoque suficiente de baterias para todos os trajetos percorridos pelo drone. Portanto, o trajeto percorrido pelo drone envolvendo a partida de um determinado cliente (ou centro distribuição), para outro cliente e por fim para um terceiro cliente (ou centro de distribuição) deve ser, no máximo, equivalente à sua autonomia.

O objetivo do problema é minimizar o tempo de retorno do caminhão e do drone (aquele que for mais tardio) ao centro de distribuição após ter entregue todos os pacotes aos clientes.

A Figura 3.1 exemplifica um cenário do FSTSP. Nela, considera-se o centro de distribuição como o ponto “0” e os clientes como os pontos “1” a “5”.

Figura 4.1 – Ilustração de cenário do FSTSP



Fonte: Elaborado pelo autor

Neste caso, o drone é responsável por realizar 2 entregas: a primeira ao cliente número 1 (partindo do cliente 3 e retornando ao cliente 4) e a segunda ao cliente 5 (partindo do cliente 4 e retornando do centro de distribuição). Por outro lado, o caminhão atende os 3 demais clientes: parte do centro de distribuição em direção ao cliente 3, seguindo para o cliente 4 e por fim para o cliente 2, para então retornar ao centro de distribuição.

5 Modelagem matemática

Este capítulo apresenta a modelagem matemática proposta para resolução do FSTSP descrito no Capítulo 3.

5.1 Conjuntos

Todos os conjuntos do problema em questão envolvem nós. Para este problema, apesar de se tratar de um mesmo ponto, o centro de distribuição foi modelado como um nó de partida e um nó de chegada diferentes. Os conjuntos utilizados são apresentados na Tabela 4.1, a seguir.

Tabela 5.1 – Conjuntos

Conjunto	Descrição
T	Todos os nós (clientes, depósito de partida e chegada)
C	Clientes
N_+	Nós de chegada (todos os nós exceto depósito de partida)
N_0	Nós de partida (todos os nós exceto depósito de chegada)

Fonte: Elaborado pelo autor

Os conjuntos N_+ e N_0 são sub-conjuntos de T , ao passo que o conjunto C é o conjunto intersecção entre os conjuntos N_+ e N_0 .

Todos os índices utilizados na formulação do problema são referentes ao conjunto T (que se inicia com índice 0, representando o centro de distribuição, e o índice $N+1$, representando este mesmo ponto), de modo que a determinação do pertencimento a determinado conjunto será realizada nas próprias restrições. Os índices utilizados são: $i, j, k, i2, j2, k2$

5.2 Variáveis de decisão

As variáveis de decisão do problema, assim como sua descrição e domínio, são apresentadas na Tabela 5.2 a seguir.

Tabela 5.2 – Variáveis de decisão

Variável de decisão	Descrição	Classificação
z	Tempo de chegada do caminhão e do drone de volta ao depósito	real
$x(i,j)$	Se o arco (i,j) é percorrido pelo caminhão ou não	binária
$y(i,j,k)$	Se o arco (i,j) é percorrido pelo drone ou não	binária
$tc(j)$	Tempo de chegada do caminhão no nó j	real
$td(j)$	Tempo de chegada do drone no nó j	real
$p(i,j)$	Se o nó i é visitado antes do nó j pelo caminhão ou não	binária
$u(j)$	Posição do nó j na rota do caminhão	real

Fonte: Elaborado pelo autor

5.3 Parâmetros

Os parâmetros do problema, assim como sua descrição, são apresentados na Tabela 5.3, a seguir.

Tabela 5.3 – Parâmetros

Parâmetros	Descrição
N	Número total de clientes
e	Autonomia do drone (em min)
Vc	Velocidade média caminhão (em km/h)
Vd	Velocidade média drone (em km/h)
Sr	Tempo de recepção drone (em min)

Parâmetros	Descrição
Sp	Tempo de preparação drone (em min)
$d(i,j)$	Distância entre i e j

Fonte: Elaborado pelo autor

5.4 Função Objetivo

O objetivo do problema é minimizar o tempo total de entrega a todos os clientes, de modo que a variável objetiva é o tempo de retorno do caminhão (cujas restrições garantem que seja simultâneo ao tempo de retorno do drone) ao centro de distribuição após atendimento de todos os clientes.

A função objetivo pode ser escrita, portanto, da seguinte forma:

$$\min z = tc(N + 1) \quad (1)$$

5.5 Restrições

As restrições do problema são apresentadas a seguir:

$$\sum_{\substack{i \in N_0 \\ i \neq j}} x(i,j) + \sum_{\substack{i \in N_0 \\ i \neq j}} \sum_{\substack{k \in N+ \\ k \neq i \\ k \neq j}} y(i,j,k) = 1, \quad \forall j \in C \quad (2)$$

A restrição (2) garante que todos os clientes sejam atendidos exatamente uma vez, seja pelo caminhão ou pelo drone.

$$\sum_{j \in N+} x(0,j) = 1 \quad (3)$$

$$\sum_{i \in N_0} x(i,N+1) = 1 \quad (4)$$

A restrição (3) garante que o caminhão parte exatamente uma vez do depósito, ao passo que a restrição (4) garante que ele retorne.

$$u(i) - u(j) \leq (N + 2)(1 - x(i,j)), \quad \forall i \in C, j \in \{N_+ : j \neq i\} \quad (5)$$

A restrição (5) é uma extensão da formulação de Miller-Tucker-Zemlin, que garante a inexistência de *subtours* para a rota do caminhão.

$$\sum_{\substack{i \in N_0 \\ i \neq k}} x(i, k) = \sum_{\substack{j \in N_+ \\ j \neq k}} x(k, j), \quad \forall k \in C \quad (6)$$

A restrição (6) garante a conservação do fluxo do caminhão ao longo dos nós da rota, isto é, que haja uma partida de cada cliente no qual o caminhão chega para entregar um produto.

$$\sum_{\substack{j \in C \\ j \neq i}} \sum_{\substack{k \in N_+ \\ k \neq i \\ k \neq j}} y(i, j, k) \leq 1, \quad \forall i \in N_0 \quad (7)$$

$$\sum_{\substack{i \in N_0 \\ i \neq k}} \sum_{\substack{j \in C \\ j \neq i \\ j \neq k}} y(i, j, k) \leq 1, \quad \forall k \in N_+ \quad (8)$$

A restrição (7) garante que o drone só decole no máximo uma vez de cada ponto de partida, ao passo que a restrição (8) garante que o drone só aterrize uma vez em cada ponto de chegada.

$$2 * y(i, j, k) \leq \sum_{\substack{i_2 \in N_0 \\ i_2 \neq i}} x(i_2, i) + \sum_{\substack{i_2 \in C \\ i_2 \neq k}} y(i_2, k), \quad , \quad \forall i \in C, j \in \{C : j \neq i\}, k \in \{N_+ : k \neq i, k \neq j\} \quad (9)$$

$$y(0, j, k) \leq \sum_{\substack{i_2 \in N_0 \\ i_2 \neq k}} x(i_2, k), \quad \forall j \in C, k \in \{N_+ : k \neq j\} \quad (10)$$

$$u(k) - u(i) \geq 1 - (N + 2) \left(1 - \sum_{\substack{j \in C \\ j \neq i \\ j \neq k}} y(i, j, k) \right), \quad \forall i \in C, k \in \{N_+ : k \neq i\} \quad (11)$$

A restrição (9) garante que o caminhão passe pelo ponto de partida e de chegada do drone, considerando exclusivamente clientes como pontos de partida, ao passo que a restrição (10) garante a mesma coisa para o caso de partida do depósito. A restrição (11) garante coerência na ordem do trajeto do caminhão em relação à do drone, garantindo que o nó de partida do drone seja percorrido pelo caminhão antes do nó de chegada.

$$td(i) \geq tc(i) - M \left(1 - \sum_{\substack{j \in C \\ j \neq i}} \sum_{\substack{k \in N_+ \\ k \neq j \\ k \neq i}} y(i, j, k) \right), \quad \forall i \in C \quad (12)$$

$$td(i) \leq tc(i) + M \left(1 - \sum_{\substack{j \in C \\ j \neq i}} \sum_{\substack{k \in N_+ \\ k \neq j \\ k \neq i}} y(i, j, k) \right), \quad \forall i \in C \quad (13)$$

$$td(k) \geq tc(k) - M \left(1 - \sum_{\substack{i \in N_0 \\ i \neq k}} \sum_{\substack{j \in C \\ j \neq i \\ j \neq k}} y(i, j, k) \right), \quad \forall k \in N_- + \quad (14)$$

$$td(k) \leq tc(k) + M \left(1 - \sum_{\substack{i \in N_0 \\ i \neq k}} \sum_{\substack{j \in C \\ j \neq i \\ j \neq k}} y(i, j, k) \right), \quad \forall k \in N_+ \quad (15)$$

As restrições (12)-(15) garantem coincidência no tempo de chegada do drone e do caminhão nos pontos de partida e chegada do drone. Essas restrições garantem a suficiência da definição da função objetivo como sendo o tempo de chegada do caminhão de volta ao depósito.

$$\begin{aligned} tc(k) &\geq tc(i) + d(i, k) * Vc + Sl(\sum_{\substack{j2 \in C \\ j2 \neq k}} \sum_{\substack{k2 \in N_+ \\ k2 \neq j2 \\ k2 \neq k}} y(k, j2, k2)) + \\ &Sr(\sum_{\substack{i2 \in N_0 \\ i2 \neq k}} \sum_{\substack{j2 \in C \\ j2 \neq i2 \\ j2 \neq k}} y(i2, j2, k)) - M(1 - x(i, k)), \quad \forall i \in N_0, k \in \{N_+: k \neq i\} \end{aligned} \quad (16)$$

$$td(j) \geq td(i) + d(i, j)/Vd - M(1 - \sum_{\substack{k \in N_+ \\ k \neq i \\ k \neq j}} y(i, j, k)), \quad \forall i \in N_0, j \in \{C: j \neq i\} \quad (17)$$

$$td(k) \geq td(j) + d(k, j)/Vd + Sr - M(1 - \sum_{\substack{i \in N_0 \\ i \neq j \\ i \neq k}} y(i, j, k)), \quad \forall j \in C, k \in \{N_+: k \neq j\} \quad (18)$$

A restrição (16) define o tempo de chegada do caminhão em determinado nó como sendo a soma do tempo de chegada no nó anterior, do tempo de trajeto entre os nós de partida e chegada (considerando distância e velocidade), o tempo de recepção do drone (caso ele esteja retornando àquele nó) e o tempo de preparação para lançamento do drone (caso ele seja lançado do nó em questão). Analogamente, as restrições (17) e (18) definem o tempo de chegada dos drones no cliente no qual fará a entrega e no nó de retorno.

$$td(k) - \left(td(j) - \frac{d(i, j)}{Vd} \right) \leq e + M(1 - y(i, j, k)), \quad \forall k \in N_+, j \in \{C: j \neq k\}, i \in \{N_0: i \neq j, i \neq k\} \quad (19)$$

A restrição (19) garante que as rotas percorridas pelo drone estejam dentro de seu limite de autonomia.

$$u(i) - u(j) \geq 1 - (N + 2)p(i, j), \quad \forall i \in C, j \in \{C: j \neq i\} \quad (20)$$

$$u(i) - u(j) \leq -1 + (N + 2)(1 - p(i, j)), \quad \forall i \in C, j \in \{C: j \neq i\} \quad (21)$$

$$p(i,j) + p(j,i) = 1, \quad \forall i \in C, j \in \{C : j = i\} \quad (22)$$

As restrições (20)-(22) garantem consistência entre as variáveis u e p .

$$td(k) \geq td(j) - M(3 - \sum_{\substack{j2 \in C \\ j2 \neq i \\ j2 \neq j}} y(i, j2, j) - \sum_{\substack{j2 \in C \\ j2 \neq i \\ j2 \neq j \\ j2 \neq k}} \sum_{\substack{k2 \in N_0 \\ k2 \neq i \\ k2 \neq j \\ k2 \neq k \\ k2 \neq j2}} y(k, j2, k2) - p(i, k)),$$

$$, \forall i \in N_0, j \in \{C : j \neq i\}, k \in \{N_+ : k \neq j, k \neq i\} \quad (23)$$

A restrição (23) garante que, em um cenário em que o drone parte de um cliente i e retorna para um cliente j e depois parta de um cliente k , o tempo de chegada em j seja inferior ao de k .

$$tc(0) = 0 \quad (24)$$

$$td(0) = 0 \quad (25)$$

$$p(0, j) = 1, \quad \forall j \in C \quad (26)$$

As restrições (24)-(26) garantem a adequação do modelo

$$u(i) \geq 1, \quad \forall i \in N_+ \quad (27)$$

$$u(i) \leq N + 2, \quad \forall i \in N_+ \quad (28)$$

$$x(i, j) \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in N_0, j \in \{N_+ : j \neq i\} \quad (29)$$

$$y(i, j, k) \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in N_0, j \in \{C : j \neq i\}, k \in \{N_+ : k \neq j, k \neq i\} \quad (30)$$

$$tc(i) \geq 0, \quad \forall i \in T \quad (31)$$

$$td(i) \geq 0, \quad \forall i \in T \quad (32)$$

$$p(i, j) \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in N_0, j \in \{N_+ : j \neq i\} \quad (33)$$

Por fim, as restrições (27)-(33) definem os domínios das variáveis de decisão e alguns valores iniciais.

6 Resultados e discussões

Este Capítulo apresenta os resultados dos experimentos, assim como uma análise crítica dos mesmos.

O modelo apresentado no Capítulo 5 foi implementado na linguagem de modelagem GAMS (versão 24.0.2), e o solver CPLEX (versão 12.0) foi utilizado para resolver um conjunto de instâncias geradas aleatoriamente conforme descrito na Seção 6.1.

6.1 Definição dos experimentos

6.1.1 Número e distribuição de clientes

Para determinar a distribuição dos clientes em torno do depósito foram considerados dois cenários, ambos considerando a área limite de um quadrado de 120 km de lado (14.400 km^2), de forma a simular um ambiente rural. No primeiro considerou-se que os clientes seriam distribuídos de maneira aleatória seguindo uma distribuição uniforme. Já no segundo cenário a distância entre os clientes e o depósito segue uma distribuição exponencial com parâmetro $\lambda = 1/30 \text{ km}$. Este segundo cenário teve como objetivo captar a situação usual em que os depósitos se localizam em áreas mais próximas a uma maior concentração de clientes. Em todos os cenários o centro de distribuição foi se encontrou no centro do quadrado e a distância entre nós foi considerada euclidiana, tanto para drones quanto para caminhões.

Por fim, para a decisão do número de clientes a ser considerado no modelo, utilizou-se dois critérios. O primeiro diz respeito à restrição computacional, isto é, a partir de qual número de clientes não se obtém a solução ótima. Já o segundo diz respeito à restrição horária, isto é, a partir de quantos clientes a função objetivo atinge valores superiores à jornada de trabalho suportada (assumiu-se o usual de 8 horas). Em experimentos preliminares foi verificado que o modelo não atingiu a solução ótima (considerando um tempo limite de otimização de 1 hora) em situações com 10 clientes, tanto em casos com distribuição exponencial quanto uniforme, apesar do fato de que, nessas situações, a função objetivo não ultrapassou à jornada de trabalho. Portanto, a fim de evitar a análise de situações sub-ótimas que podem distorcer as conclusões do trabalho, decidiu-se considerar cenários com 5, 7 e 9 clientes. Contudo, para testar os limites computacionais do modelo, fez-se testes também com 11 clientes. Para cada situação de número de clientes e forma de distribuição, geraram-se 3 instâncias a fim de absorver eventuais distorções estatísticas das distribuições geográficas.

Foram gerados, portanto, 24 cenários (3 instâncias x 2 distribuições x 4 números de clientes), que são apresentados no Apêndice B.

6.1.2 Demais parâmetros

A fim de identificar a sensibilidade das características dos drones na redução no tempo total de entrega, foram definidos diferentes valores para alguns parâmetros na geração de cenários. Para a autonomia (e) do drone foram consideradas autonomias de 20 minutos e 40 minutos, ao passo que para a sua velocidade média (Vd) foram consideradas velocidades médias de 40 km/h e 80 km/h, ambos condizentes com os atuais atributos dos drones, como observado na Seção 2.2. A velocidade média do caminhão (Vc) foi considerada como 60 km/h para todos os cenários, simulando um contexto de vias expressas. O tempo de recuperação (Sr) e de preparação para o lançamento (Sl) foram assumidos como 2 minutos. Por fim, para geração dos cenários sem utilização dos drones, considerou-se autonomia de vôo (e) igual a 0. Portanto, os 24 cenários gerados resultaram em 120 experimentos (cada um deles testado com 2 velocidades x 2 tempos de autonomia, além do cenário sem drone).

Por fim, o valor de M deve ser grande o suficiente para superar o tempo de chegada do caminhão de volta ao depósito, isto é, a função objetivo. Como este tempo é a função objetivo do problema e, assim, não definida *a priori*, o valor de M usado em cada cenário é determinado do valor da função objetivo obtida no respectivo cenário, uma vez que a inclusão deste elemento pode somente igualar ou diminuir o tempo de chegada do caminhão.

6.2 Abordagem e softwares usados

Para resolução do modelo, o trabalho computacional foi conduzido em um computador com processador i7 3,60GHz com 16GB de RAM instalada rodando o programa GAMS, versão 24.0.2, no solver CPLEX versão 12.8. O tempo limite de execução para cada experimento foi de 3.600 segundos (1 hora).

O modelo da função objetivo e restrições, na linguagem computacional na qual foram geradas as simulações, é apresentado no Apêndice A.

6.3 Resultados

Os principais resultados dos testes são apresentados nesta subseção. Uma visão detalhada de todos os resultados obtidos nos testes é apresentado no Apêndice C.

6.3.1 Função objetivo e utilização dos drones

Nesta Subseção são apresentados os resultados tanto no que diz respeito à utilização de drones quanto dos valores da função objetivo, seguidos por uma análise crítica dos mesmos.

As médias dos valores da função objetivo, de acordo com cada cenário, são apresentadas na Tabela 6.1 a seguir.

Tabela 6.1 – Resultados obtidos com os testes de acordo com cada cenário

		Função Objetivo					
		40km/h		80km/h		Sem drone	
		Velocidade	Autonomia	20 min	40 min	20 min	40 min
Distribuição Exponencial	5 Clientes		159,7	152,3	152,3	145,4	160,3
	7 Clientes		339,0	337,7	337,7	327,5	339,3
	9 Clientes		238,0	232,7	232,7	221,4	238,0
	11 Clientes		330,0	323,7	324,3	328,0	330,0
Distribuição Uniforme	5 Clientes		267,0	267,0	267,0	263,0	267,0
	7 Clientes		318,7	317,0	318,7	314,6	318,7
	9 Clientes		388,3	388,3	388,3	386,3	388,3
	11 Clientes		377,7	375,3	377,7	371,9	377,7

Fonte: elaborado pelo autor

Ainda, para melhor evidenciar a influência da utilização dos drones na função objetivo, elaborou-se a Tabela 6.2 com o ganho de tempo relativo entre os cenários com drones e o sem.

Tabela 6.2 – Ganhos relativos na comparação da função objetivo com drones vs sem drones

		Função Objetivo Com Drone / Sem Drone						
		Velocidade		40km/h		80km/h		Sem drone
		Autonomia		20 min	40 min	20 min	40 min	
Distribuição Exponencial	5 Clientes			0,4%	5,0%	5,0%	9,3%	0%
	7 Clientes			0,1%	0,5%	0,5%	3,5%	0%
	9 Clientes			0,0%	2,2%	2,2%	7,0%	0%
	11 Clientes			0,0%	1,9%	1,7%	0,6%	0%
Distribuição Uniforme	5 Clientes			0,0%	0,0%	0,0%	1,5%	0%
	7 Clientes			0,0%	0,5%	0,5%	1,3%	0%
	9 Clientes			0,0%	0,0%	0,0%	0,5%	0%
	11 Clientes			0,0%	0,6%	0,0%	1,5%	0%

Fonte: elaborado pelo autor

Para verificar o nível de utilização dos drones para cada um dos cenários gerados, calculou-se a média de clientes atendidos por drones em cada um dos cenários, dado que é apresentado na Tabela 6.3 a seguir.

Tabela 6.3 – Número médio de clientes atendidos por drones em cada cenário

		Número de Clientes Atendidos por Drone						
		Velocidade		40km/h		80km/h		Sem drone
		Autonomia	20 min	40 min	20 min	40 min		
Distribuição Exponencial	5 Clientes		0,7	0,7	0,7	1,0	0,0	
	7 Clientes		0,3	0,7	0,7	1,3	0,0	
	9 Clientes		0,3	1,0	1,0	2,0	0,0	
	11 Clientes		0,7	1,0	1,0	2,0	0,0	
Distribuição Uniforme	5 Clientes		0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	
	7 Clientes		0,0	0,3	0,0	0,7	0,0	
	9 Clientes		0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	
	11 Clientes		0,0	0,3	0,0	1,7	0,0	

Fonte: elaborado pelo autor

E, a fim de balizar este número de clientes atendidos por drones em comparação ao número total de clientes, apresenta-se a Tabela 6.4 a seguir com um valor relativo do número total de clientes atendidos por drones em comparação com o total de clientes do modelo em questão.

Tabela 6.4 – Número relativo de clientes atendidos por drone em comparação com total de clientes de cada modelo

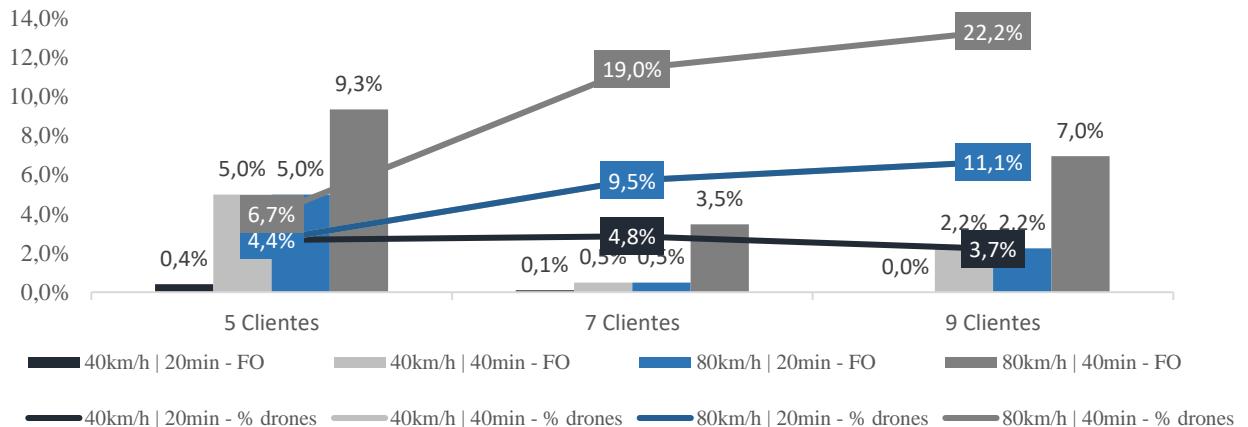
		% Clientes Atendidos por Drone						
		Velocidade		40km/h		80km/h		Sem drone
		Autonomia	20 min	40 min	20 min	40 min		
Distribuição Exponencial	5 Clientes		13,3%	13,3%	13,3%	20,0%	0,0%	
	7 Clientes		4,8%	9,5%	9,5%	19,0%	0,0%	
	9 Clientes		3,7%	11,1%	11,1%	22,2%	0,0%	
	11 Clientes		6,1%	9,1%	9,1%	18,2%	0,0%	
Distribuição Uniforme	5 Clientes		0,0%	0,0%	0,0%	6,7%	0,0%	
	7 Clientes		0,0%	4,8%	0,0%	9,5%	0,0%	
	9 Clientes		0,0%	0,0%	0,0%	11,1%	0,0%	
	11 Clientes		0,0%	3,0%	0,0%	15,2%	0,0%	

Fonte: elaborado pelo autor

Primeiramente, para uma análise crítica dos resultados obtidos, não foram considerados os resultados obtidos com 11 clientes, uma vez que nesses casos não só não se obteve a solução ótima como também se chegou a resultados com um gap de otimalidade de 100%, como será observado na Subseção 6.3.3 (houve cenários, inclusive, que a solução com drones apresentou uma função objetiva superior à condição sem drones). Portanto, a fim de evitar conclusões inverídicas acerca das influências dos fatores no resultado, analizaram-se somente os cenários com 5, 7 e 9 clientes.

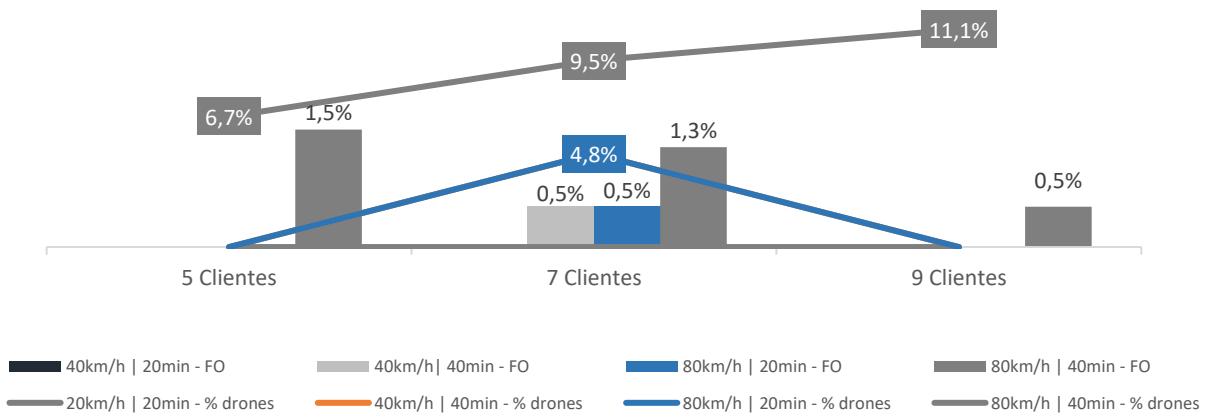
Uma vez que um dos principais objetivos do trabalho é entender o potencial dos drones como possibilidades da diminuição do tempo de entrega na *last mile delivery*, procurou-se entender a correlação do número de clientes atendidos pelo drone em comparação com o ganho relativo na função objetivo, isto é, o tempo total do percurso de entrega. Esta visão comparativa é apresentada nas Figuras 6.1 e 6.2 a seguir.

Figura 6.1 – Análise do ganho relativo com drones em situação de distribuição exponencial



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 6.2 – Análise do ganho relativo com drones em situação de distribuição uniforme



Fonte: elaborado pelo autor

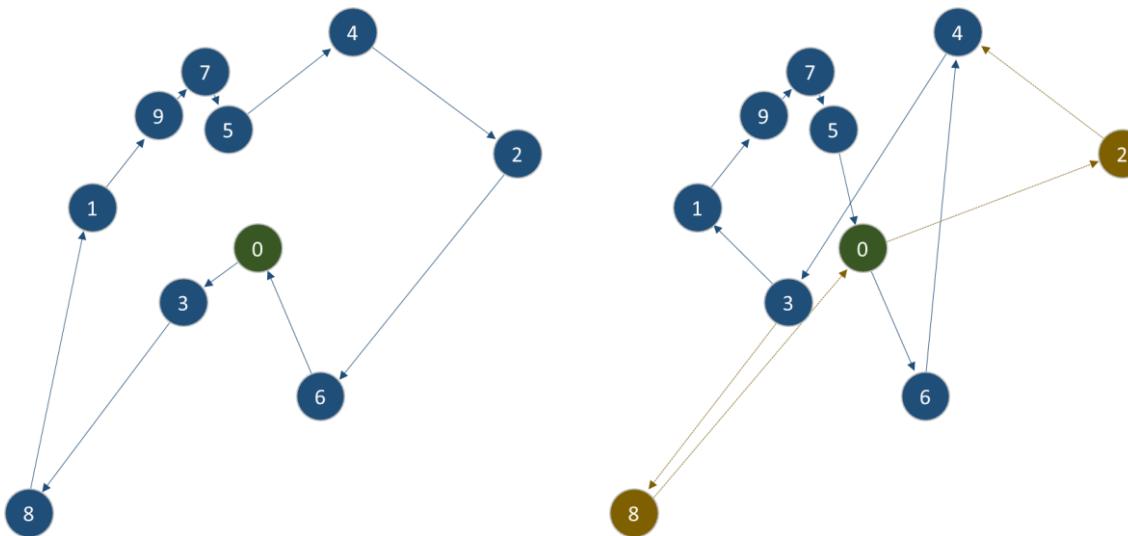
A primeira observação a partir dos gráficos apresentados diz respeito ao ganho relativo na função objetivo do cenário com distribuição exponencial em comparação com o cenário de distribuição uniforme. Há uma evidente discrepância entre esses ganhos: ao passo em que a diminuição média do tempo total de entrega nos cenários com distribuição exponencial ficou em 4%, levando-se em consideração todos os cenários em comparação, esse valor não alcançou 1% nos cenários com distribuição uniforme. Mais notável ainda é que, nos cenários com distribuição uniforme, em somente em 7 dos 45 testes houve utilização do drone, dos quais 6 foram em situações de maior autonomia e velocidade. Esse fenômeno já era esperado considerando que, em um cenário com distribuição uniforme, há uma maior probabilidade das distâncias médias entre pontos serem mais elevadas do que em um cenário com distribuição

exponencial, em que os clientes tendem a ficar mais concentrados em torno do centro de distribuição.

Outra observação importante se refere à equivalência de resultados nas condições de autonomia de 20 min com velocidade média de 80 km/h e 40 min com velocidade média de 40 km/h. A partir deste fato é possível concluir que o fator determinante para utilização dos drones deve ser interpretado como a junção dos 2 parâmetros, isto é, a autonomia em distância. Esse fato evidencia que o fator limitante para a utilização dos drones nos cenários era a distância entre os clientes e o centro de distribuição, que era impeditiva em diversas ocasiões, sobretudo nos cenários com distribuição uniforme dada a maior distância média entre os nós (fato que é confirmado pelos gráficos).

Para exemplificar os resultados obtidos, decidiu-se ilustrar o resultado que apresentou o maior ganho percentual na função objetivo em comparação à situação sem drones. Este resultado foi o do cenário 2 com distribuição exponencial e 9 clientes, considerando velocidade de 80 km/h e autonomia de 40 minutos. Os clientes atendidos pelo caminhão são aqueles destacados em azul, ao passo que os clientes atendidos pelo drone são os destacados em amarelo. Uma comparação horária é apresentada na parte inferior da Figura 6.3 a seguir.

Figura 6.3 – Apresentação da solução com maior ganho relativo da função objetivo



0 -> 3	3 -> 8	8 -> 1	1 -> 9	9 -> 7	7 -> 5	5 -> 4	4 -> 2	2 -> 6	6 -> 0	137 min
0 -> 6	6 -> 4		4 -> 3	3 -> 1	1 -> 9	9 -> 7	7 -> 5	5 -> 0		
0 -> 2	2 -> 4			3 -> 8	8 -> 0					103 min

Fonte: elaborado pelo autor

No exemplo, a figura da esquerda representa o trajeto sendo percorrido exclusivamente pelo caminhão, com tempo total de trajeto (função objetivo) de 137 minutos. Já na direita, apresenta-se o cenário com utilização de drone, que atendeu 2 clientes (ou 22% dos clientes disponíveis), resultando em um ganho no tempo total do trajeto de 25%.

6.3.2 Esforços computacionais

Ainda nesta Subseção de resultados, julga-se importante apresentar os efeitos computacionais do modelo nos cenários testados, realizando uma análise crítica também do modelo em si e de sua capacidade de aplicação.

Primeiramente, para que seja apresentado o nível de complexidade do modelo elaborado, apresentam-se na Tabela 6.5 o número total de variáveis e o número total de variáveis discretas, para cada nível de quantidade de clientes.

Tabela 6.5 – Número de variáveis do modelo de acordo com número de clientes

	Número Total de Variáveis	Número de Variáveis Discretas
5 Clientes	277	256
7 Clientes	623	596
9 Clientes	1177	1144
11 Clientes	1987	1948

Fonte: elaborado pelo autor

Por fim, na Tabela 6.6 a seguir é apresentado o tempo de execução médio do modelo em cada cenário, em segundos.

Tabela 6.6 – Tempo de execução médio do modelo, em segundos

		Tempo de Execução do Programa						
		Velocidade		40km/h		80km/h		Sem drone
		Autonomia	20 min	40 min	20 min	40 min		
Distribuição Exponencial	5 Clientes		0,18	0,27	0,26	0,68	0,13	
	7 Clientes		2,79	5,40	4,95	12,85	2,51	
	9 Clientes		246,41	819,54	748,16	1.796,84	949,88	
	11 Clientes		3.600,00	3.600,00	3.600,00	3.600,00	3.600,00	
Distribuição Uniforme	5 Clientes		0,14	0,12	0,12	0,21	0,13	
	7 Clientes		2,85	2,75	2,85	4,83	2,85	
	9 Clientes		122,02	165,03	121,88	344,55	139,05	
	11 Clientes		3.600,00	3.600,00	3.600,00	3.600,00	3.600,00	

Fonte: elaborado pelo autor

É interessante notar que em todos testes com 11 clientes o fator limitante para a obtenção da resposta foi o tempo limite da execução do programa, isto é, 1 hora, ao passo que em todos os demais testes foi encontrada a solução ótima. Ainda, é notável o fato de que em todos testes com 11 clientes o gap de otimalidade ficou acima de 90%.

Primeiramente, o modelo tinha como objetivo representar uma jornada de 8 h (ou 480 minutos). No entanto, como já exposto previamente, mesmo nos cenários com 11 clientes, em que a solução ótima não foi atingida, o tempo médio não superou os 480 minutos (chegando, no máximo, a 449 minutos). Portanto, é possível entender que o número de clientes poderia, inclusive, ser maior do que 11 para conseguir “preencher” uma jornada diária.

É interessante notar, ainda, que foi refeita um teste com um dos cenários de 11 clientes, mas desta vez limitando o tempo máximo de execução em 24 h (86.400 segundos), e, mesmo sob esta nova condição, o valor ótimo não foi atingido.

7 Conclusões e trabalhos futuros

Primeiramente, a partir do trabalho de revisão da literatura, são fortes os sinais de que os drones apresentam maiores potenciais de servirem como veículos na *last mile delivery* em ambiente rural, explorando um mercado que, atualmente, não consegue ser atendido com um nível de serviço cada vez mais desejado pelo cliente final.

Já com respeito às simulações realizadas neste trabalho, é possível perceber que os drones podem trazer ganhos significativos (redução superior à 10% do tempo total de percurso), e que, como era de se esperar, o principal fator limitante para o seu sucesso é a sua autonomia do drone em termos de distância, que pode se tornar fator crítico em condições de alta dispersão dos clientes.

No entanto, devido às restrições computacionais, pouco se pôde concluir com respeito à potencialidade do uso da tecnologia. O principal fator limitante à uma análise mais robusta foi a incapacidade do modelo, nas condições de teste estabelecidas, de gerar soluções ótimas com um número significativo de clientes tal qual representasse efetivamente uma jornada de trabalho. Sob essa mesma perspectiva, a alta demanda de tempo para que o modelo executasse os cenários estudados limitou o número de simulações possíveis, inviabilizando uma análise estatística mais robusta acerca das influências dos parâmetros. No entanto, foi possível notar que a distribuição espacial, mesmo que sob uma mesma área considerada, tem uma forte influência sobre os resultados (aumento do valor da função objetiva, em média, 34% da distribuição uniforme para a exponencial, considerando somente simulações ótimas).

Assim, como sugestões futuras, seria interessante o desenvolvimento de uma heurística de resolução que permita o atingimento de soluções melhores em tempo hábil, assim como a execução de testes em computadores com maior capacidade de processamento. Com isso, seria possível validar o resultado esperado de que, com um maior número de clientes e uma menor distância média entre eles, os ganhos com a utilização de drones são mais significativos. Recomenda-se ainda, restringir a área de atuação a, por exemplo, 25% da área definida neste trabalho, a fim de representar um cenário no qual múltiplos caminhões sairiam do mesmo centro de distribuição, cada um carregado com um drone e responsável por uma área. Acredita-se que a influência dos drones, nesse cenário, será mais significativa, uma vez que a restrição de autonomia seria menos significativa.

Ainda, como sugestões para trabalhos futuros, seria interessante a extensão do modelo aqui revisitado para tratar o problema no qual um ou mais caminhões partem do centro de

distribuição com um ou mais drones, com as demais restrições do problema deste trabalho. Este problema seria mais capaz de representar a realidade, uma vez que faz pouco sentido um centro de distribuição ser suportado somente por um caminhão percorrendo toda a área de seu entorno, ao mesmo tempo que cada caminhão conseguiria facilmente carregar mais do que um drone. Esse problema poderia ser modelado de forma muito similar à apresentada neste trabalho, com o acréscimo de um índice associado à numeração do caminhão e/ou drone, além de ajustes nas restrições. Outra possível extensão do modelo que visasse representar de forma mais fidedigna a realidade, seria o relaxamento da restrição de que os drones devem partir e reencontrar o caminhão necessariamente em nós (clientes ou centro de distribuição), podendo qualquer trecho da rota funcionar como um ponto de partida e reencontro.

Por fim, por se tratar de um problema que tem aplicações práticas e cujo sucesso depende fortemente de sua viabilidade financeira, é fundamental que valores reais (como densidade populacional de uma área rural, frequência de pedidos nesse contexto, custo de operação do drone e caminhão, entre outros) sirvam como *inputs* ao modelo, de modo que se consiga ter uma visão mais clara sobre a influência econômica que os drones podem exercer, seja reduzindo a quantidade necessária de caminhões ou possibilitando uma maior cobrança pelo serviço dada a redução do tempo de entrega.

Referências bibliográficas

- AGATZ, N.; BOUMAN, P.; SCHMIDT, M. Optimization Approaches for the Traveling Salesman Problem with Drone. **ERIM Report Series Reference**. 2016.
- BAIN. **Challenges and winning models in logistics**. Bain Brief. 2012.
- BARNEY, J.; CLARK, D. **Resource-Based Theory: Creating and Sustaining Competitive Advantage**. Oxford: Oxford University Press. 2007.
- BENJAMIN, J. An analysis of mode choice for shippers in a constrained network with applications to just-in-time inventory. **Transportation Research Part B**. v. 24, p. 229-245, 1990.
- BCG. **Business Model Innovation**: When the game gets tough, change the game. 2009.
- BOYER, K.; M. PRUD'HOMME, A.; CHUNG, W. The Last Mile Challenge: Evaluating the Effects of Customer Density and Delivery Window Patterns. **Journal of Business Logistics**. v. 30, p. 185 – 201, 2009.
- BOYER, K. K.; FROHLICH, M. T.; HULT, G. T. M. **Extending the supply chain: How cutting-edge companies bridge the critical last mile into customers' homes**. New York: Amacon. 2004.
- BHUSIRI, N.; QURESHI, A. G.; TANIGUCHI, E., 2014. Application of the Just-In-Time Concept in Urban Freight Transport. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**. v. 125, p. 171-185, 2014.
- D'ONFRO, J. Jeff Bezos Says Amazon's Delivery Drones Are 'Truly Remarkable,' But You Probably Won't See Them Soon. **Business Insider**. Disponível em: <<https://www.businessinsider.com/amazon-jeff-bezos-delivery-drones-amazon-prime-air-2014-12>>. Acesso em: 16 jan. 2018.
- CAROLI, M. G.; MONARCA, U.; SIMONELLI, F.; VALENTINO, A. **The business model of international express couriers: From value chain to policy indicators**. Luiss Business School. 2010.
- CHANG, C. T.; CHOU, H. C. A coordination system for seasonal demand problems in the supply chain. **Applied Mathematical Modelling**. v. 37, 2012.
- CHANG, T. S.; WAN, Y. W.; OOI, W. T. A stochastic dynamic travelling salesman problem with hard time windows. **European Journal of Operational Research**. v. 198, p. 748-759, 2009.
- CHANG, Y. S.; LEE, H. J. Optimal delivery routing with wider drone-delivery areas along a shorter truck-route. **Expert Systems with Applications**. v. 104, p. 307-317, 2018.
- CURRENT, J. R.; SCHILLING, D. A. The covering salesman problem. **Transportation science**. v. 23, p. 208-213, 1989.
- DANTZIG, G.; FULKERSON, R.; JOHNSON, S. 1954. Solution of a large-scale traveling-salesman problem. **Operations Research**. v. 2, p. 393–410, 1954.
- DONAHOE, S. **Amazon and Drone Delivery: The Pros and Cons**, 2015. Disponível em: <<http://imsuccesscenter.com/amazon-and-drone-delivery-the-pros-and-cons/>>. Acesso em: 16 jan 2018.
- DAVIS, B. R.; MENTZER, J. T. Logistics Driven Loyalty: An Exploratory Study. **Journal of Business Logistics**. v. 27, p 53-74, 2006.

- ECOMMERCE FOUNDATION. **Global B2C E-commerce report**, 2016. Disponível em: <https://www.ecommercewiki.org/wikis/www.ecommercewiki.org/images/5/56/Global_B2C_Ecommerce_Report_2016.pdf>. Acesso em: 16 jan. 2018.
- EHMKE, J.; MATTFELD, D. Vehicle Routing for Attended Home Delivery in City Logistics. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 39, p. 622-632, 2012.
- ESPER, T.L.; JENSEN, T.D.; TURNIPSEED, F.L.; BURTON, S. The Last Mile: An Examination of Effects of Online Retail Delivery Strategies on Consumers. **Journal of Business Logistics**. p. 177-192, 2003.
- GEVAERS, R.; VAN DE VOORDE, E.; VANELSLANDER, T. Cost Modelling and Simulation of Last-mile Characteristics in an Innovative B2C Supply Chain Environment with Implications on Urban Areas and Cities. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**. v. 125, p. 398–411, 2014.
- GOUNLEY, T. **Commercial use of drones: With strict FAA regulation, some locally wait for exemption, others just fly**. News Leader. 2015.
- HA, Q. M.; DEVILLE, Y.; PHAM, Q. D.; HÀ, M. H. On the min-cost Traveling Salesman Problem with Drone. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**. v. 86, p. 597-621, 2018.
- HAYASHI, K.; NEMOTO, T.; VISSER, J.J., 2014. E-commerce and City Logistics Solution. **City logistics: Mapping the future**. p. 55-78, 2014.
- HOWELL, E. **What is a drone**, 2015. Disponível em: <<https://www.space.com/29544-what-is-a-drone.html>>. Acesso em 16 jan. 2018.
- IWAN, S.; KIJEWSKA, K.; LEMKE, J. Analysis of Parcel Lockers' Efficiency as the Last Mile Delivery Solution – The Results of the Research in Poland. In **Transportation Research Procedia**. v. 12, p. 644-655, 2016.
- LOPEZ, E. **Why is the last mile so inefficient**, 2017. Disponível em: <<https://www.supplychaindive.com/news/last-mile-spotlight-inefficient-perfect-delivery/443089/>>. Acesso em 16 jan. 2018.
- MCKINSEY. **Parcel delivery: The future of last mile**. McKinsey Travel, Transport and Logistics. 2016.
- KETCHEN, D. J.; GIUNIPERO, L. C. The intersection of strategic management and supply chain management. **Industrial Marketing Management**. v. 33, p. 51-56, 2004.
- MACQUEEN, J. B. Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In **Proceedings of the fifth symposium on math, statistics, and probability**. University of California Press. p. 281-297, 1967.
- MCCOLLON, E. **Drone delivery is about revolutionize the supply chain industry**, 2017. Disponível em: <<https://redstagfulfillment.com/drone-delivery-is-about-to-revolutionize-the-supply-chain-industry/>>. Acesso em 16 jan. 2018.
- MENTZER, J. T.; SOONHONG, M.; BOBBIT, L. M. Toward a unified theory of logistics. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**. p. 606-627, 2004.

- MCGLAUN, S. **Matternet station supports fully automated battery and package exchange for drone networks**, 2017. Disponível em: <<https://www.slashgear.com/matternet-station-supports-fully-automated-battery-and-package-exchange-for-drone-networks-20500817/>>. Acesso em 16 jan. 2018.
- MURRAY, C. C.; CHU, A. G. The flying sidekick traveling salesman problem: Optimization of drone-assisted parcel delivery. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**. v. 54, p. 86–109, 2015.
- OHNO, T. **Toyota production system: Beyond large-scale production**. Oregon: Productivity Press. 1988.
- OLAVARRIETA, S.; ELLINGER, A. E. Resource-based theory and strategic logistics research. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**. v. 27, p. 559-587, 1997.
- ONG, T. **The first autonomous drone delivery network will fly above Switzerland starting next month**, 2017. Disponível em: <<https://www.theverge.com/2017/9/20/16325084/matternet-autonomous-drone-network-switzerland>>. Acesso em> 16 jan. 2018.
- PWC. **Shifting patterns: The future of logistics industry**. PwC's future insight series. 2016.
- SANDBERG, E.; KIHLÉN, T.; ABRAHAMSSON, M. Characteristics of a Logistics-Based Business Model. **Journal of Marketing Channels**. p. 1-23, 2011.
- SCHREURS, M.; STEUWER, S.D. **Autonomous Driving – Political, Legal, Social and Sustainability Dimensions, in Autonomes Fahren**. Heidelberg: Springer Vieweg. p. 151-174, 2015.
- STANFORD BUSINESS. **Technological disruption and innovation in last mile delivery**. White paper. 2016.
- STORHAGEN, N. G.; HELLBERG, R. Just-in-time from a business logistics perspective. **Engineering Costs and Production Economics**. v. 12, p. 117-121, 1987.
- TAVANA, M.; KHALILI-DAMGHANI, K.; SANTOS-ARTEAGA, F. J.; ZANDI, M. Drone shipping versus truck delivery in a cross-docking system with multiple fleets and products. **Expert Systems with Applications**. v. 72, p. 93-107, 2017.
- TIAN, C. H. et al. BEAM: A framework for business ecosystem analysis and modeling. **IBM Systems Journal**. v. 47, p. 101–114, 2008.
- VISSEER, J.; NEMOTO, T.; BORWNE, M. Home Delivery and the Impacts on Urban Freight Transport: A Review. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**. v. 125, p. 15-27, 2014.
- WANG, D. **The Economics of Drone Delivery**, 2016. Disponível em: <<https://www.flexport.com/blog/drone-delivery-economics/>>. Acesso em 17 jan. 2018.
- WATTLES, J. **Jeff Bezos: Amazon drones will be ‘as common as seeing a mail truck**, 2015. Disponível em: <<https://money.cnn.com/2015/08/16/technology/jeff-bezos-amazon-drones/index.html>>. Acesso em 16 jan. 2018.
- WINKENBACH, M.; JANJEVIC, M. Classification of last-mile delivery models for e-commerce distribution – a global perspective. **10th International Conference on City Logistics**, Phuket, Tailândia, 2017.

YU, S.; HUNG, Y. Comparisons of three mixed integer programming models for parallel machine scheduling. **IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management**, Bali. p. 917-921, 2016.

Apêndice A – Programação em GAMS

Neste apêndice é apresentada a programação em GAMS utilizada na geração dos experimentos elaborados neste trabalho.

SETS

T

Alias (i, T);

Alias (i1, T);

Alias (i2, T);

Alias (i3, T);

Alias (j, T);

Alias (j1, T);

Alias (j2, T);

Alias (j3, T);

Alias (k, T);

Alias (k1, T);

Alias (k2, T);

Alias (k3, T);

VARIABLES

z

x(i,j)

y(i,j,k)

tc(j)

td(j)

p(i,j)

$u(T)$

BINARY VARIABLE $x, y, p;$

POSITIVE VARIABLE $tc, td, u;$

EQUATIONS

FO

ENTREGA_UNICA_CLIENTES(j)

PARTIDA_DO_DEPOSITO

CHEGADA_NO_DEPOSITO

ELIMINACAO_SUBTOUR(i,j)

CHEGADA_PARTIDA_NO(T)

NOS_PARTIDA_DRONE(i)

NOS_CHEGADA_DRONE(k)

CAMINHAO_NOS_PONTOS_DRONE(i,j,k)

CAMINHAO_NOS_PONTOS_DRONE_SAINDO_DEPOSITO(i,k)

ANTECEDENCIA_CAMINHAO_COM_DRONE(i,j)

PARTIDA_SIMULTANEA_UP(i)

PARTIDA_SIMULTANEA_LOW(i)

CHEGADA_SIMULTANEA_UP(k)

CHEGADA_SIMULTANEA_LOW(k)

COERENCIA_TEMPO_VIAGEM_CAMINHAO(i,k)

COERENCIA_TEMPO_VIAGEM_DRONE_1PERNA(i,j)

COERENCIA_TEMPO_VIAGEM_DRONE_2PERNA(j,k)

RESTRICAO_AUTONOMIA(i,j,k)

COERENCIA_ORDEM_P1(i,j)

COERENCIA_ORDEM_P2(i,j)

COERENCIA_ORDEM_P3(i,j)

COERENCIA_ORDEM_DRONE(i,j,k)

TEMPO_INICIAL_CAMINHAO

TEMPO_INICIAL_DRONE

PRECEDENCIA_DEPOSITO(i)

DEFINICAO_u_P1(j)

DEFINICAO_u_P2(j)

FO .. z = e = SUM(j\$(ORD(j) = CARD(j)), tc(j));

ENTREGA_UNICA_CLIENTES(j) \$ (ORD(j) <> 1 AND ORD(j) <> CARD(j)) ..
 SUM(i\$(ORD(i) <> ORD(j) AND ORD(i) <> CARD(i)), x(i,j)) + SUM(i\$(ORD(i) <> ORD(j)
 AND ORD(i) <> CARD(i)), SUM(k\$(ORD(k) <> ORD(j) AND ORD(k) <> ORD(i) AND
 ORD(k) <> 1), y(i,j,k))) = e = 1;

PARTIDA_DO_DEPOSITO .. SUM(j\$(ORD(j) <> 1), x('0',j)) = e = 1;

CHEGADA_NO_DEPOSITO .. SUM(i\$(ORD(i) <> CARD(i)), SUM(j\$(ORD(j) = CARD(j)),
 x(i,j))) = e = 1;

ELIMINACAO_SUBTOUR(i,j) \$ (ORD(i) <> ORD(j) AND ORD(i) <> 1 AND ORD(i) <>
 CARD(i) AND ORD(j) <> 1).. u(i) - u(j) + 1 = 1 = (N+2)*(1-x(i,j));

CHEGADA_PARTIDA_NO(k) \$ (ORD(k) <> 1 AND ORD(k) <> CARD(k)) ..
 SUM(i\$(ORD(i) <> ORD(k) AND ORD(i) <> CARD(i)), x(i,k)) = e = SUM(j\$(ORD(j) <>
 ORD(k) AND ORD(j) <> 1), x(k,j));

NOS_PARTIDA_DRONE(i) \$ (ORD(i) <> CARD(i)) .. SUM(j\$(ORD(j) <> ORD(i) AND
 ORD(j) <> 1 AND ORD(j) <> CARD(j)), SUM(k\$(ORD(k) <> ORD(j) AND ORD(k) <>
 ORD(i) AND ORD(k) <> 1), y(i,j,k))) = 1 = 1;

NOS_CHEGADA_DRONE(k) \$ (ORD(k) <> 1) .. SUM(i\$(ORD(i) <> ORD(k) AND ORD(i) <> CARD(i)), SUM(j\$(ORD(j) <> CARD(j) AND ORD(j) <> 1 AND ORD(j) <> ORD(i) AND ORD(j) <> ORD(k)), y(i,j,k))) = 1 = 1;

CAMINHAO_NOS_PONTOS_DRONE(i,j,k) \$ (ORD(i) <> ORD(j) AND ORD(i) <> 1 AND ORD(i) <> CARD(i) AND ORD(j) <> 1 AND ORD(j) <> CARD(j) AND ORD(k) <> 1 AND ORD(k) <> ORD(i) AND ORD(k) <> ORD(j)) .. 2*y(i,j,k) = 1 = SUM(i1\$(ORD(i1) <> ORD(i) AND ORD(i1) <> CARD(i1)), x(i1,i)) + SUM(i2\$(ORD(i2) <> ORD(k) AND ORD(i2) <> 1 AND ORD(i2) <> CARD(i2)), x(i2,k));

CAMINHAO_NOS_PONTOS_DRONE_SAINDO_DEPOSITO(j,k) \$ (ORD(j) <> ORD(k) AND ORD(j) <> 1 AND ORD(j) <> CARD(j) AND ORD(k) <> 1) .. y('0',j,k) = 1 = SUM(i2\$(ORD(i2) <> CARD(i2) AND ORD(i2) <> ORD(k)), x(i2,k));

ANTECEDENCIA_CAMINHAO_COM_DRONE(i,k) \$ (ORD(i) <> 1 AND ORD(i) <> CARD(i) AND ORD(i) <> ORD(k) AND ORD(k) <> 1) .. u(k) - u(i) = g = 1 - (N+2)*(1 - SUM(j\$(ORD(j) <> 1 AND ORD(j) <> CARD(j) AND ORD(j) <> ORD(i) AND ORD(j) <> ORD(k)), y(i,j,k)));

PARTIDA_SIMULTANEA_UP(i) \$ (ORD(i) <> 1 AND ORD(i) <> CARD(i)) .. td(i) = g = tc(i) - M*(1 - SUM(j\$(ORD(j) <> 1 AND ORD(j) <> CARD(j) AND ORD(j) <> ORD(i))), SUM(k\$(ORD(k) <> 1 AND ORD(k) <> ORD(j) AND ORD(k) <> ORD(i)), y(i,j,k))));

PARTIDA_SIMULTANEA_LOW(i) \$ (ORD(i) <> 1 AND ORD(i) <> CARD(i)) .. td(i) = 1 = tc(i) + M*(1 - SUM(j\$(ORD(j) <> 1 AND ORD(j) <> CARD(j) AND ORD(j) <> ORD(i))), SUM(k\$(ORD(k) <> 1 AND ORD(k) <> ORD(j) AND ORD(k) <> ORD(i)), y(i,j,k))));

CHEGADA_SIMULTANEA_UP(k) \$ (ORD(k) <> 1) .. td(k) = g = tc(k) - M*(1 - SUM(i\$(ORD(i) <> CARD(i) AND ORD(i) <> ORD(k))), SUM(j\$(ORD(j) <> 1 AND ORD(j) <> CARD(j) AND ORD(j) <> ORD(i) AND ORD(j) <> ORD(k)), y(i,j,k))));

CHEGADA_SIMULTANEA_LOW(k) \$ (ORD(k) <> 1) .. td(k) = 1 = tc(k) + M*(1 - SUM(i\$(ORD(i) <> CARD(i) AND ORD(i) <> ORD(k))), SUM(j\$(ORD(j) <> 1 AND ORD(j) <> CARD(j) AND ORD(j) <> ORD(i) AND ORD(j) <> ORD(k)), y(i,j,k))));

COERENCIA_TEMPO_VIAGEM_CAMINHAO(i,k) \$ (ORD(i) <> ORD(k) AND ORD(i) <> CARD(i) AND ORD(k) <> 1) .. tc(k) = g = tc(i) + d(i,k)/Vc + Sp*(SUM(j2\$(ORD(j2) <> 1 AND ORD(j2) <> ORD(k) AND ORD(j2) <> CARD(j2))), SUM(j3\$(ORD(j3) <> 1 AND ORD(j3) <> ORD(j2) AND ORD(j3) <> ORD(k)), y(k,j2,j3))) + Sr*(SUM(j2\$(ORD(j2) <>

CARD(j2) AND ORD(j2) \leftrightarrow ORD(k)), SUM(j3\$(ORD(j3) \leftrightarrow 1 AND ORD(j3) \leftrightarrow CARD(j3)) AND ORD(j3) \leftrightarrow ORD(j2) AND ORD(j3) \leftrightarrow ORD(k)), y(j2,j3,k))) - M*(1 - x(i,k));

COERENCIA_TEMPO_VIAGEM_DRONE_1PERNA(i,j) \$ (ORD(i) \leftrightarrow ORD(j) AND ORD(i) \leftrightarrow CARD(i) AND ORD(j) \leftrightarrow 1 AND ORD(j) \leftrightarrow CARD(j)) .. td(j) = g = td(i) + d(i,j)/Vd - M*(1-SUM(k\$(ORD(k) \leftrightarrow ORD(i) AND ORD(k) \leftrightarrow ORD(j) AND ORD(k) \leftrightarrow 1), y(i,j,k)));

COERENCIA_TEMPO_VIAGEM_DRONE_2PERNA(j,k) \$ (ORD(j) \leftrightarrow ORD(k) AND ORD(j) \leftrightarrow 1 AND ORD(j) \leftrightarrow CARD(j) AND ORD(k) \leftrightarrow 1) .. td(k) = g = td(j) + d(j,k)/Vd + Sr - M*(1-SUM(i\$(ORD(i) \leftrightarrow ORD(j) AND ORD(i) \leftrightarrow ORD(k) AND ORD(i) \leftrightarrow CARD(i)), y(i,j,k)));

RESTRICAO_AUTONOMIA(i,j,k) \$ (ORD(i) \leftrightarrow ORD(j) AND ORD(i) \leftrightarrow ORD(k) AND ORD(k) \leftrightarrow ORD(j) AND ORD(i) \leftrightarrow CARD(i) AND ORD(j) \leftrightarrow 1 AND ORD(j) \leftrightarrow CARD(j) AND ORD(k) \leftrightarrow 1) .. td(k) - td(j) + d(i,j)/Vd = l = e + M*(1 - y(i,j,k));

COERENCIA_ORDEM_P1(i,j) \$ (ORD(i) \leftrightarrow ORD(j) AND ORD(i) \leftrightarrow 1 AND ORD(i) \leftrightarrow CARD(i) AND ORD(j) \leftrightarrow 1 AND ORD(j) \leftrightarrow CARD(j)) .. u(i) - u(j) = g = 1 - (N+2)*p(i,j);

COERENCIA_ORDEM_P2(i,j) \$ (ORD(i) \leftrightarrow ORD(j) AND ORD(i) \leftrightarrow 1 AND ORD(i) \leftrightarrow CARD(i) AND ORD(j) \leftrightarrow 1 AND ORD(j) \leftrightarrow CARD(j)) .. u(i) - u(j) = l = -1 + (N+2)*(1 - p(i,j));

COERENCIA_ORDEM_P3(i,j) \$ (ORD(i) \leftrightarrow ORD(j) AND ORD(i) \leftrightarrow 1 AND ORD(i) \leftrightarrow CARD(i) AND ORD(j) \leftrightarrow 1 AND ORD(j) \leftrightarrow CARD(j)) .. p(i,j) + p(j,i) = e = 1;

COERENCIA_ORDEM_DRONE(i,j,k) \$ (ORD(i) \leftrightarrow CARD(i) AND ORD(j) \leftrightarrow 1 AND ORD(j) \leftrightarrow CARD(j) AND ORD(k) \leftrightarrow 1 AND ORD(k) \leftrightarrow ORD(i) AND ORD(k) \leftrightarrow ORD(j)) .. td(j) = g = td(k) - M*(3 - SUM(j2\$(ORD(j2) \leftrightarrow 1 AND ORD(j2) \leftrightarrow CARD(j2) AND ORD(j2) \leftrightarrow ORD(j)), y(i,j2,k)) - SUM(j3\$(ORD(j3) \leftrightarrow 1 AND ORD(j3) \leftrightarrow CARD(j3) AND ORD(j3) \leftrightarrow ORD(i) AND ORD(j3) \leftrightarrow ORD(j) AND ORD(j3) \leftrightarrow ORD(k)), SUM(k2\$(ORD(k2) \leftrightarrow 1 AND ORD(k2) \leftrightarrow ORD(i) AND ORD(k2) \leftrightarrow ORD(k)), y(j,j3,k2))) - p(i,j));

TEMPO_INICIAL_CAMINHAO .. tc('0') = e = 0;

TEMPO_INICIAL_DRONE .. td('0') = e = 0;

PRECEDENCIA_DEPOSITO(j) \$ (ORD(j) \leftrightarrow CARD(j) AND ORD(j) \leftrightarrow 1) .. p('0',j) = e = 1;

DEFINICAO_u_P1(i) \$ (ORD(i) <> 1) .. 1 =l= u(i);

DEFINICAO_u_P2(i) \$ (ORD(i) <> 1) .. u(i) =l= N+2;

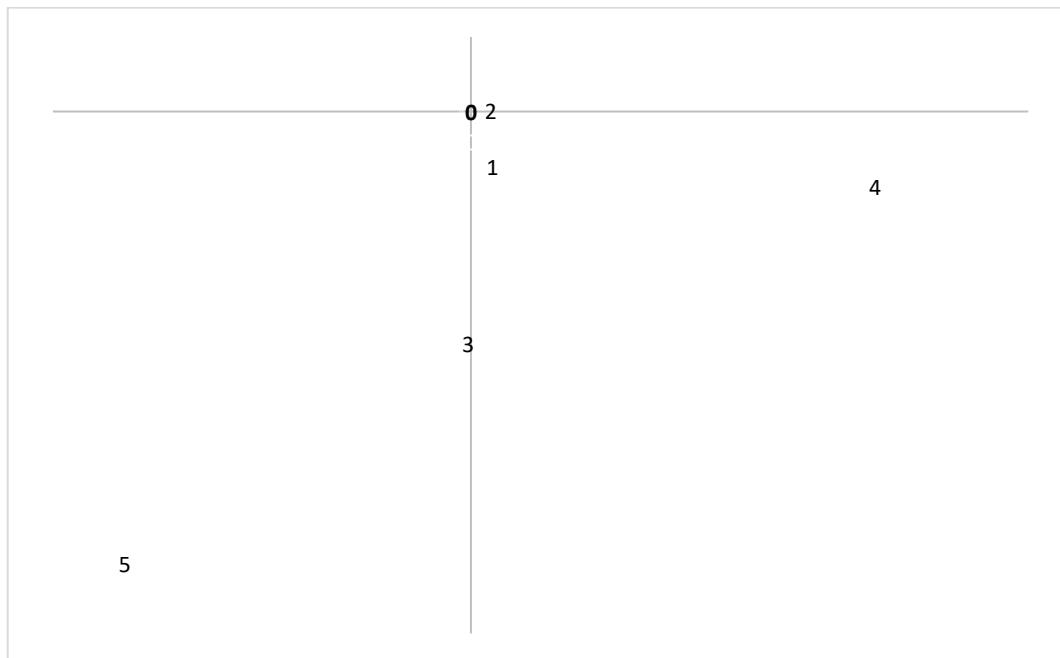
MODEL FSTSP /all/;

SOLVE FSTSP using MIP minimizing z;

Apêndice B - Cenários gerados

Este apêndice apresenta de maneira gráfica o posicionamento dos clientes e do centro de distribuição em todos os cenários elaborados, bem como a distância entre nós para cada cenário.

Figura B.1 – Distribuição exponencial clientes e centro distribuição no cenário 1 com 5 clientes

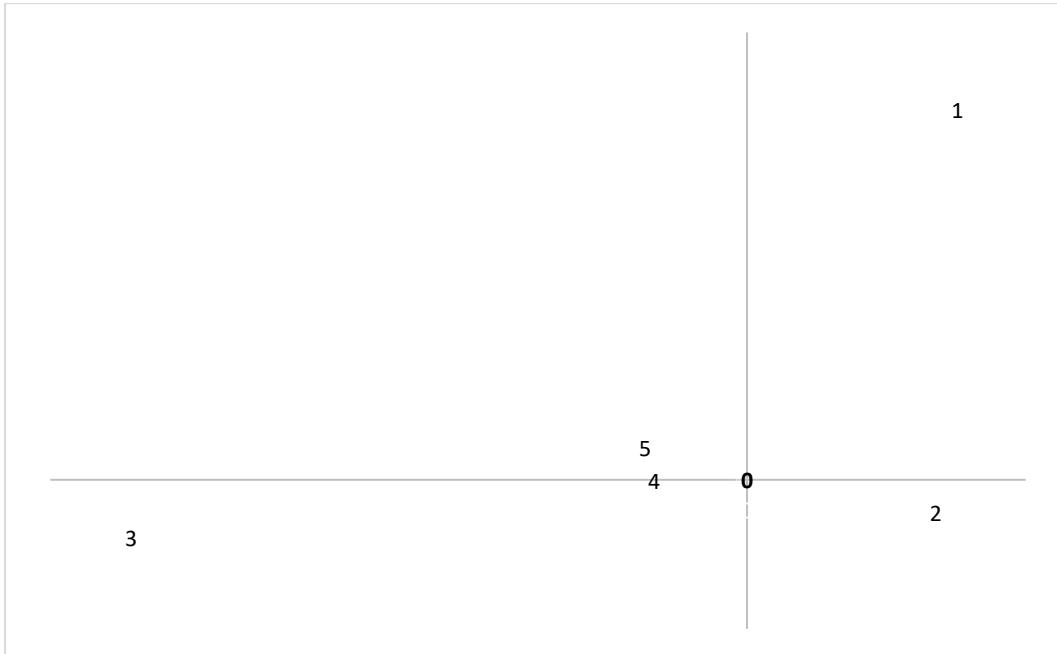


Fonte: elaborado pelo autor

Tabela B.1 – Distâncias entre nós com distribuição uniforme no cenário 1 com 5 clientes

D	0	1	2	3	4	5	6
0	0	2	1	6	29	28	0
1	2	0	2	5	27	28	2
2	1	2	0	6	28	29	1
3	6	5	6	0	30	25	6
4	29	27	28	30	0	55	29
5	28	28	29	25	55	0	28
6	0	2	1	6	29	28	0

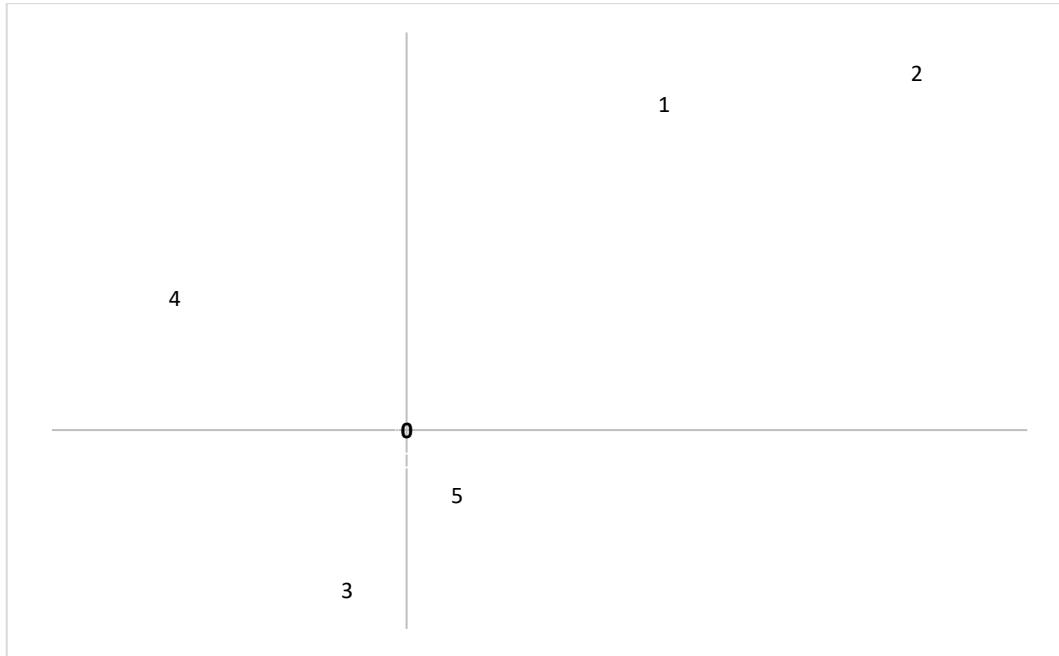
Fonte: elaborado pelo autor

Figura B.2 - Distribuição exponencial clientes e centro distribuição no cenário 2 com 5 clientes**Fonte:** elaborado pelo autor**Tabela B.2 – Distâncias entre nós com distribuição uniforme no cenário 2 com 5 clientes**

D	0	1	2	3	4	5	6
0	0	100	11	27	3	9	0
1	100	0	108	118	100	91	100
2	11	108	0	29	13	20	11
3	27	118	29	0	24	30	27
4	3	100	13	24	0	9	3
5	9	91	20	30	9	0	9
6	0	100	11	27	3	9	0

Fonte: elaborado pelo autor

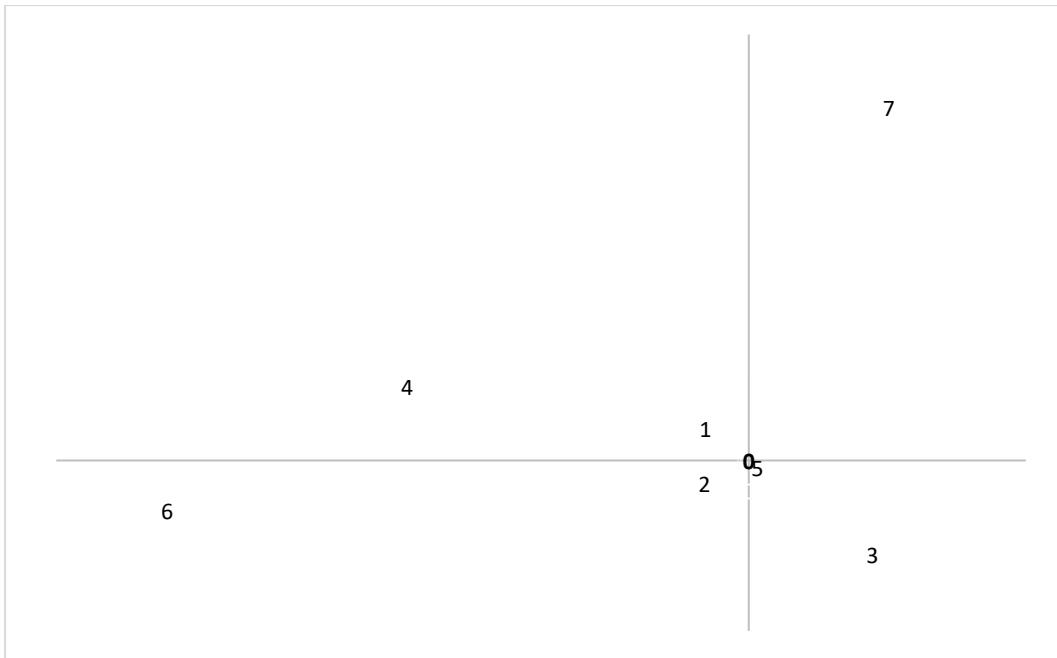
Figura B.3 - Distribuição exponencial clientes e centro distribuição cenário 3 com 5 clientes



Fonte: elaborado pelo autor

Tabela B.3 – Distâncias entre nós com distribuição uniforme no cenário 3 com 5 clientes

D	0	1	2	3	4	5	6
0	0	22	34	9	15	4	0
1	22	0	14	30	29	23	22
2	34	14	0	41	43	33	34
3	9	30	41	0	18	8	9
4	15	29	43	18	0	19	15
5	4	23	33	8	19	0	4
6	0	22	34	9	15	4	0

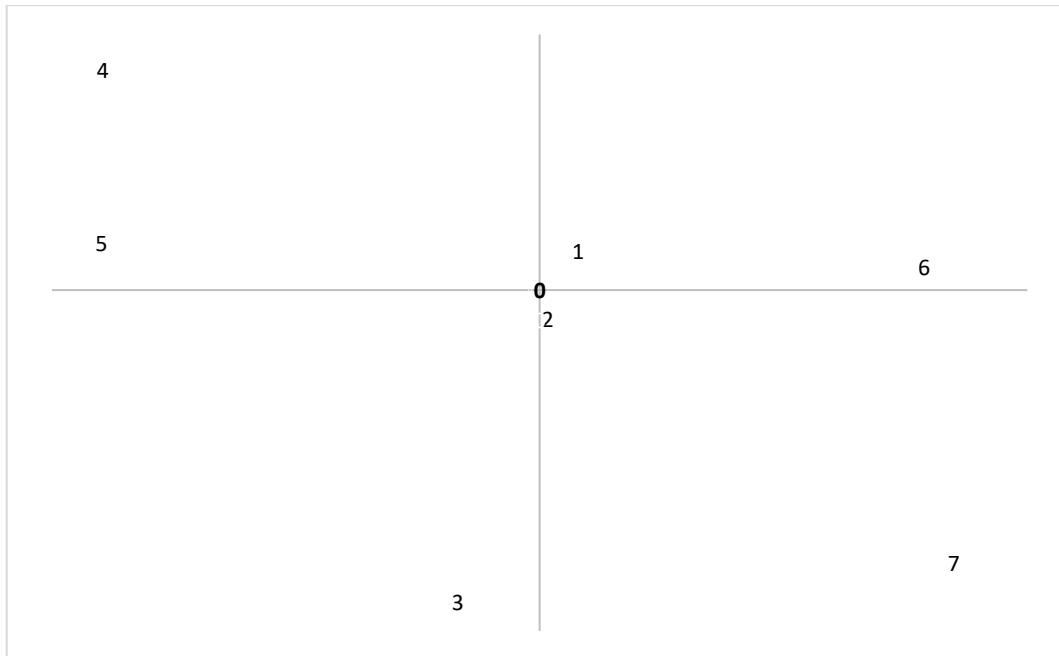
Figura B.4 - Distribuição exponencial clientes e centro distribuição cenário 1 com 7 clientes

Fonte: elaborado pelo autor

Tabela B.4 – Distâncias entre nós com distribuição uniforme no cenário 1 com 7 clientes

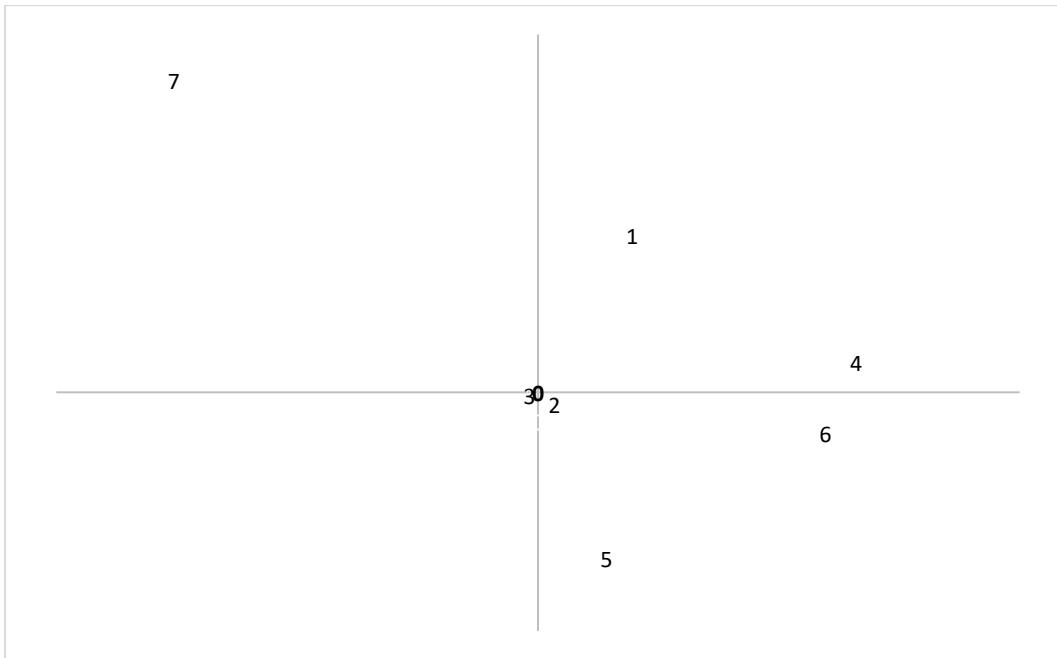
D	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	0	7	7	21	50	1	84	46	0
1	7	0	6	28	43	9	78	46	7
2	7	6	0	26	44	8	78	52	7
3	21	28	26	0	70	19	102	52	21
4	50	43	44	70	0	51	38	77	50
5	1	9	8	19	51	0	85	46	1
6	84	78	78	102	38	85	0	114	84
7	46	46	52	52	77	46	114	0	46
8	0	7	7	21	50	1	84	46	0

Fonte: elaborado pelo autor

Figura B.5 - Distribuição exponencial clientes e centro distribuição cenário 2 com 7 clientes**Fonte:** elaborado pelo autor**Tabela B.5 – Distâncias entre nós com distribuição uniforme no cenário 2 com 7 clientes**

D	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	0	3	2	19	26	23	20	27	0
1	3	0	4	21	27	24	18	27	3
2	2	4	0	17	27	23	20	25	2
3	19	21	17	0	36	28	31	25	19
4	26	27	27	36	0	10	44	52	26
5	23	24	23	28	10	0	42	48	23
6	20	18	20	31	44	42	0	17	20
7	27	27	25	25	52	48	17	0	27
8	0	3	2	19	26	23	20	27	0

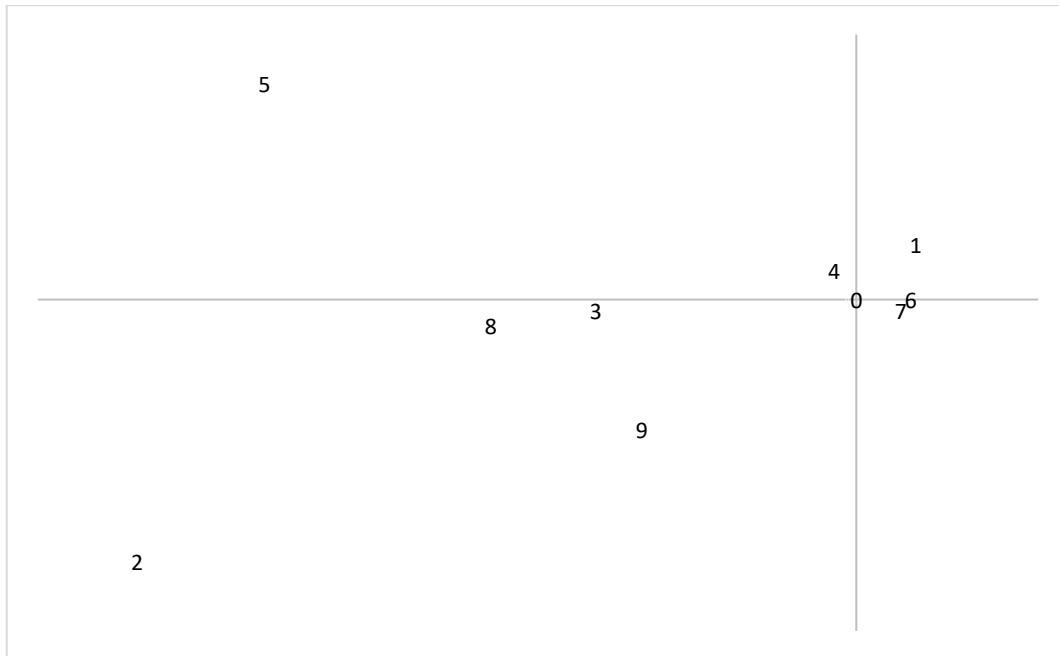
Fonte: elaborado pelo autor

Figura B.6 - Distribuição exponencial clientes e centro distribuição cenário 3 com 7 clientes**Fonte:** elaborado pelo autor**Tabela B.6 – Distâncias entre nós com distribuição uniforme no cenário 3 com 7 clientes**

D	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	0	72	7	3	100	73	91	173	0
1	72	0	75	73	88	136	103	157	72
2	7	75	0	9	96	67	85	180	7
3	3	73	9	0	103	73	94	171	3
4	100	88	96	103	0	113	31	243	100
5	73	136	67	73	113	0	86	241	73
6	91	103	85	94	31	86	0	251	91
7	173	157	180	171	243	241	251	0	173
8	0	72	7	3	100	73	91	173	0

Fonte: elaborado pelo autor

Figura B.7 - Distribuição exponencial clientes e centro distribuição cenário 1 com 9 clientes

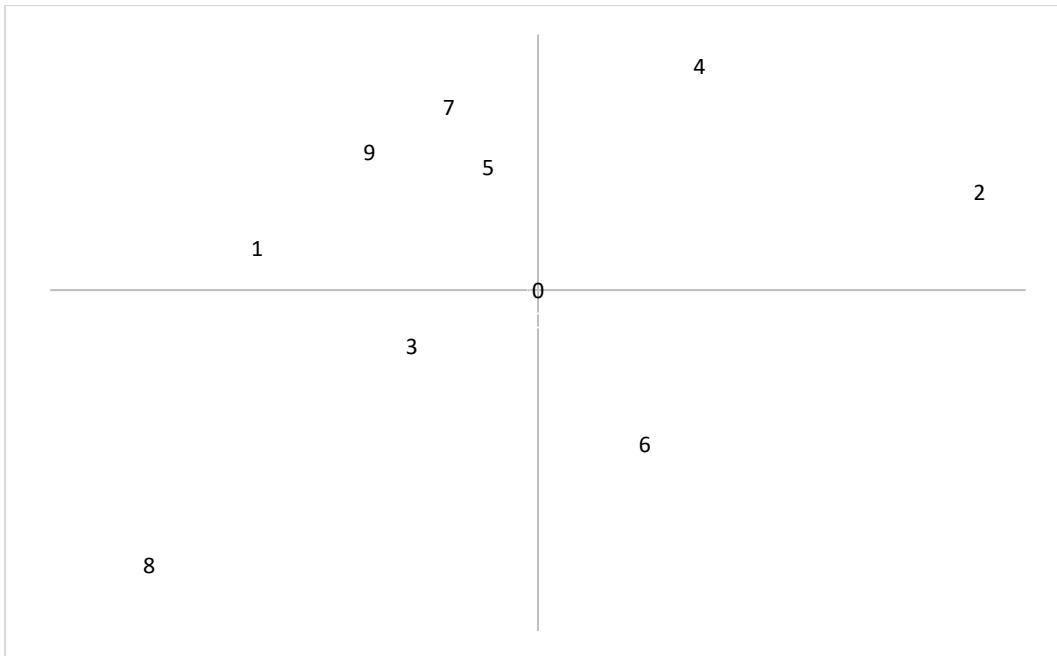


Fonte: elaborado pelo autor

Tabela B.7 – Distâncias entre nós com distribuição uniforme no cenário 1 com 9 clientes

D	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	9	56	14	4	46	3	3	20	23	0
1	9	0	64	20	6	43	8	10	26	32	9
2	56	64	0	45	58	72	58	57	41	34	56
3	14	20	45	0	14	39	17	17	6	18	14
4	4	6	58	14	0	42	6	7	21	26	4
5	46	43	72	39	42	0	48	49	39	56	46
6	3	8	58	17	6	48	0	2	23	25	3
7	3	10	57	17	7	49	2	0	23	23	3
8	20	26	41	6	21	39	23	23	0	18	20
9	23	32	34	18	26	56	25	23	18	0	23
10	0	9	56	14	4	46	3	3	20	23	0

Fonte: elaborado pelo autor

Figura B.8 - Distribuição exponencial clientes e centro distribuição cenário 2 com 9 clientes

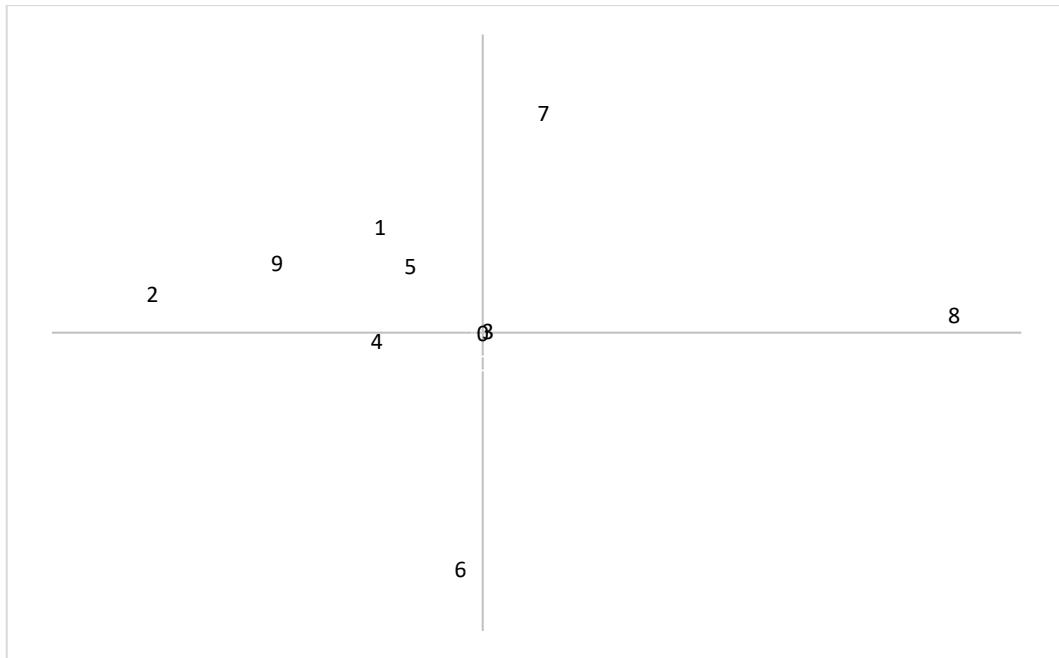
Fonte: elaborado pelo autor

Tabela B.8 – Distâncias entre nós com distribuição uniforme no cenário 2 com 9 clientes

D	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	17	28	8	17	8	11	12	29	13	0
1	17	0	45	11	29	15	26	14	20	9	17
2	28	45	0	36	19	30	25	33	56	38	28
3	8	11	36	0	24	12	15	14	21	12	8
4	17	29	19	24	0	14	22	16	45	21	17
5	8	15	30	12	14	0	19	4	31	7	8
6	11	26	25	15	22	19	0	23	31	24	11
7	12	14	33	14	16	4	23	0	33	6	12
8	29	20	56	21	45	31	31	33	0	28	29
9	13	9	38	12	21	7	24	6	28	0	13
10	0	17	28	8	17	8	11	12	29	13	0

Fonte: elaborado pelo autor

Figura B.9 - Distribuição exponencial clientes e centro distribuição cenário 3 com 9 clientes

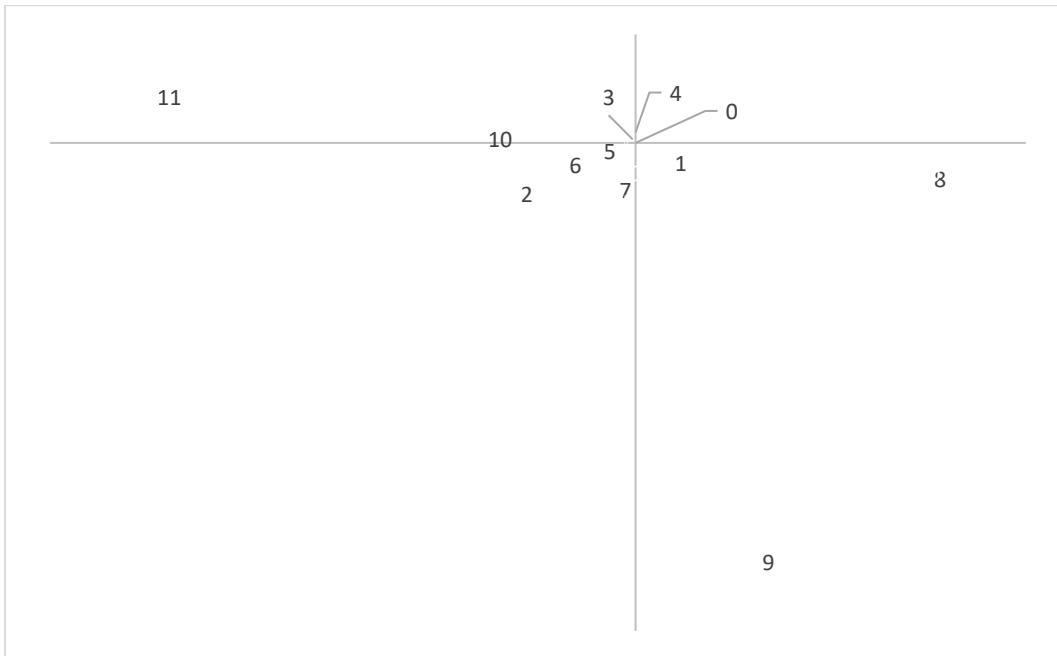


Fonte: elaborado pelo autor

Tabela B.9 – Distâncias entre nós com distribuição uniforme no cenário 3 com 9 clientes

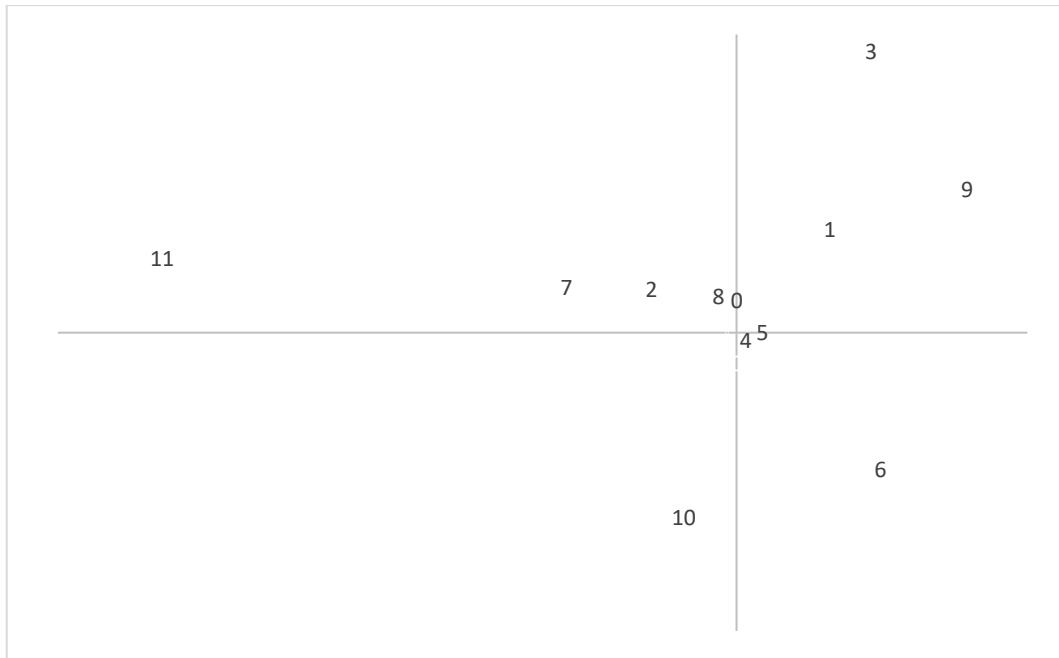
D	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	26	62	1	20	18	40	39	88	40	0
1	26	0	44	27	19	9	59	36	108	20	26
2	62	44	0	63	42	48	73	79	149	24	62
3	1	27	63	0	21	18	40	38	87	41	1
4	20	19	42	21	0	14	41	49	107	23	20
5	18	9	48	18	14	0	52	36	101	25	18
6	40	59	73	40	41	52	0	78	101	62	40
7	39	36	79	38	49	36	78	0	83	56	39
8	88	108	149	87	107	101	101	83	0	126	88
9	40	20	24	41	23	25	62	56	126	0	40
10	0	26	62	1	20	18	40	39	88	40	0

Fonte: elaborado pelo autor

Figura B.10 - Distribuição exponencial clientes e centro distribuição cenário 1 com 11 clientes**Fonte:** elaborado pelo autor**Tabela B.10 - Distâncias entre nós com distribuição exponencial no cenário 1 com 11 clientes**

D	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	0	6	15	1	2	3	7	9	32	78	14	49	0
1	6	0	17	7	7	8	11	8	27	74	19	54	6
2	15	17	0	15	16	12	7	10	42	72	10	41	15
3	1	7	15	0	1	3	7	9	32	79	14	48	1
4	2	7	16	1	0	4	9	11	32	80	14	48	2
5	3	8	12	3	4	0	4	7	34	78	11	46	3
6	7	11	7	7	9	4	0	7	37	76	9	43	7
7	9	8	10	9	11	7	7	0	32	70	16	50	9
8	32	27	42	32	32	34	37	32	0	73	46	80	32
9	78	74	72	79	80	78	76	70	73	0	83	105	78
10	14	19	10	14	14	11	9	16	46	83	0	35	14
11	49	54	41	48	48	46	43	50	80	105	35	0	49
12	0	6	15	1	2	3	7	9	32	78	14	49	0

Fonte: elaborado pelo autor

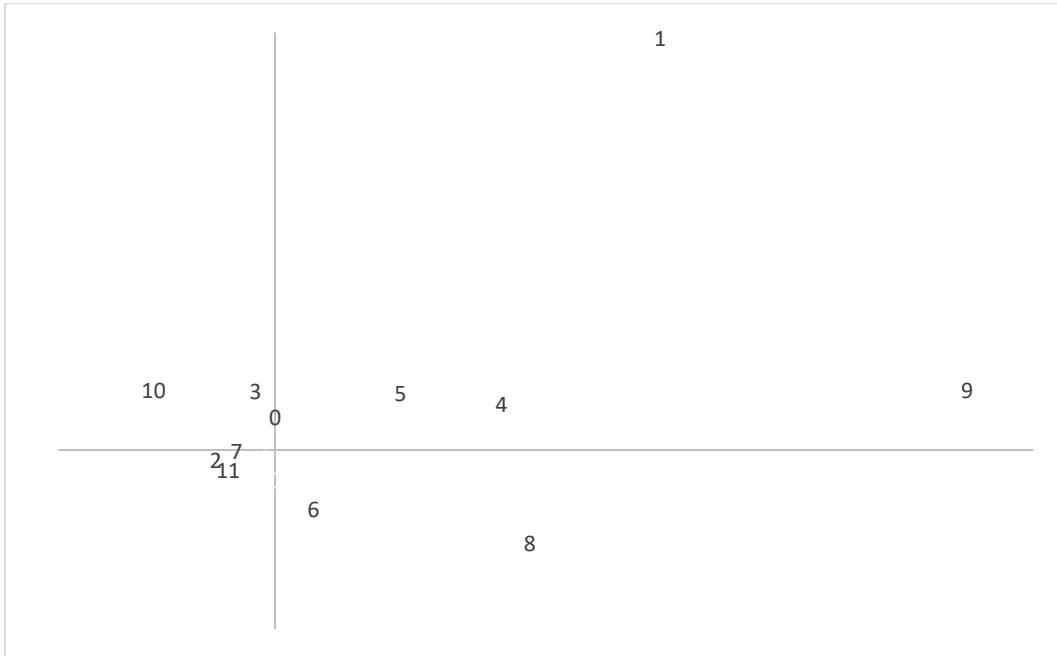
Figura B.11 - Distribuição exponencial clientes e centro distribuição cenário 2 com 11 clientes

Fonte: elaborado pelo autor

Tabela B.0.11 - Distâncias entre nós com distribuição exponencial no cenário 2 com 11 clientes

D	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	0	24	18	57	8	9	45	35	4	52	45	119	0
1	24	0	39	37	28	25	50	56	27	29	65	138	24
2	18	39	0	66	22	25	60	18	14	68	46	101	18
3	57	37	66	0	64	61	84	79	59	34	101	152	57
4	8	28	22	64	0	4	38	39	11	55	38	122	8
5	9	25	25	61	4	0	37	41	12	51	41	125	9
6	45	50	60	84	38	37	0	74	48	59	42	154	45
7	35	56	18	79	39	41	74	0	31	85	52	84	35
8	4	27	14	59	11	12	48	31	0	56	45	115	4
9	52	29	68	34	55	51	59	85	56	0	88	167	52
10	45	65	46	101	38	41	42	52	45	88	0	120	45
11	119	138	101	152	122	125	154	84	115	167	120	0	119
12	0	24	18	57	8	9	45	35	4	52	45	119	0

Fonte: elaborado pelo autor

Figura B.12 - Distribuição exponencial clientes e centro distribuição cenário 3 com 11 clientes

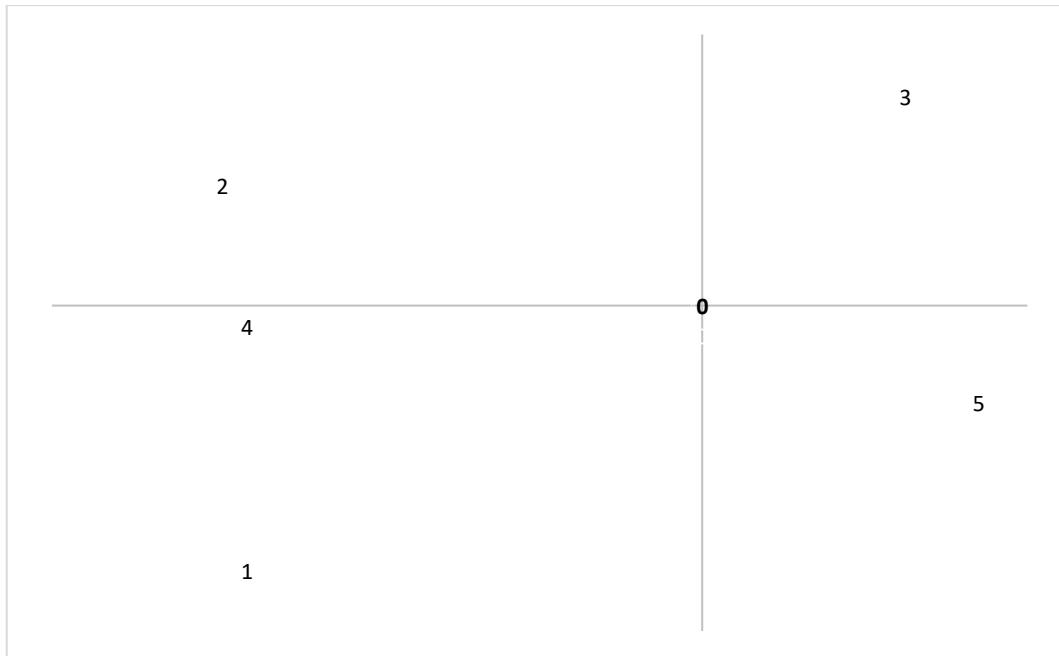
Fonte: elaborado pelo autor

Tabela B.0.12 - Distâncias entre nós com distribuição exponencial no cenário 3 com 11 clientes

D	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	0	73	9	5	21	12	16	7	32	64	12	10	0
1	73	0	82	70	63	64	85	79	86	66	75	83	73
2	9	82	0	12	28	20	12	2	32	70	13	2	9
3	5	70	12	0	23	13	20	10	36	66	9	13	5
4	21	63	28	23	0	9	25	26	23	43	32	28	21
5	12	64	20	13	9	0	21	18	28	52	23	20	12
6	16	85	12	20	25	21	0	12	21	63	25	10	16
7	7	79	2	10	26	18	12	0	31	68	13	3	7
8	32	86	32	36	23	28	21	31	0	48	43	30	32
9	64	66	70	66	43	52	63	68	48	0	75	69	64
10	12	75	13	9	32	23	25	13	43	75	0	15	12
11	10	83	2	13	28	20	10	3	30	69	15	0	10
12	0	73	9	5	21	12	16	7	32	64	12	10	0

Fonte: elaborado pelo autor

Figura B.13 - Distribuição uniforme clientes e centro distribuição cenário 1 com 5 clientes

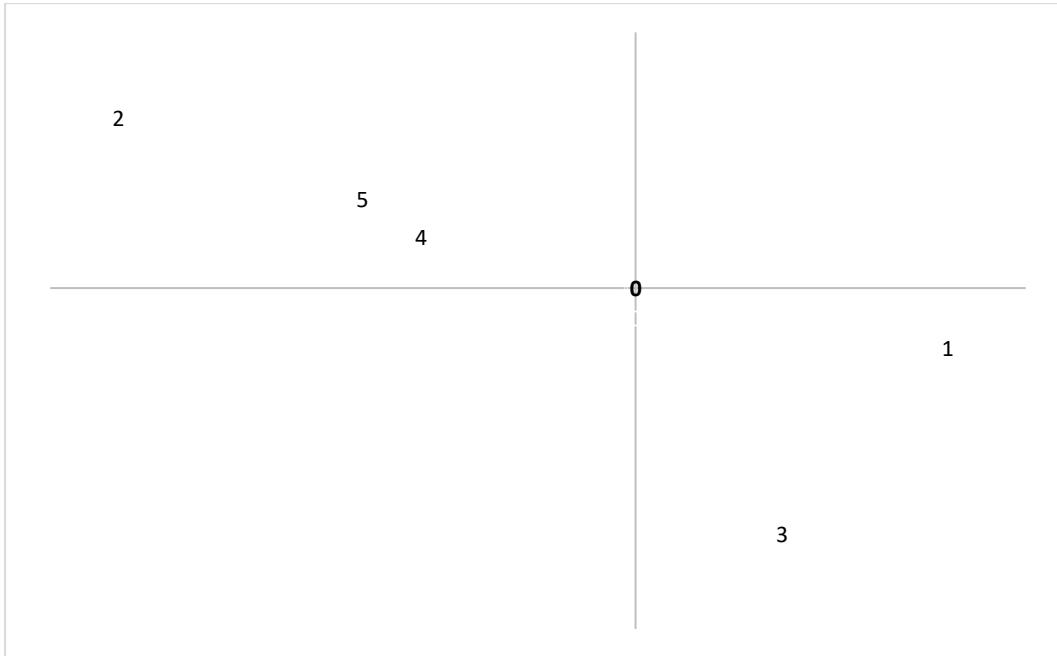


Fonte: elaborado pelo autor

Tabela B.0.13 – Distâncias entre nós com distribuição uniforme no cenário 1 com 5 clientes

D	0	1	2	3	4	5	6
0	0	74	63	46	56	38	0
1	74	0	71	120	45	95	74
2	63	71	0	86	26	101	63
3	46	120	86	0	92	58	46
4	56	45	26	92	0	91	56
5	38	95	101	58	91	0	38
6	0	74	63	46	56	38	0

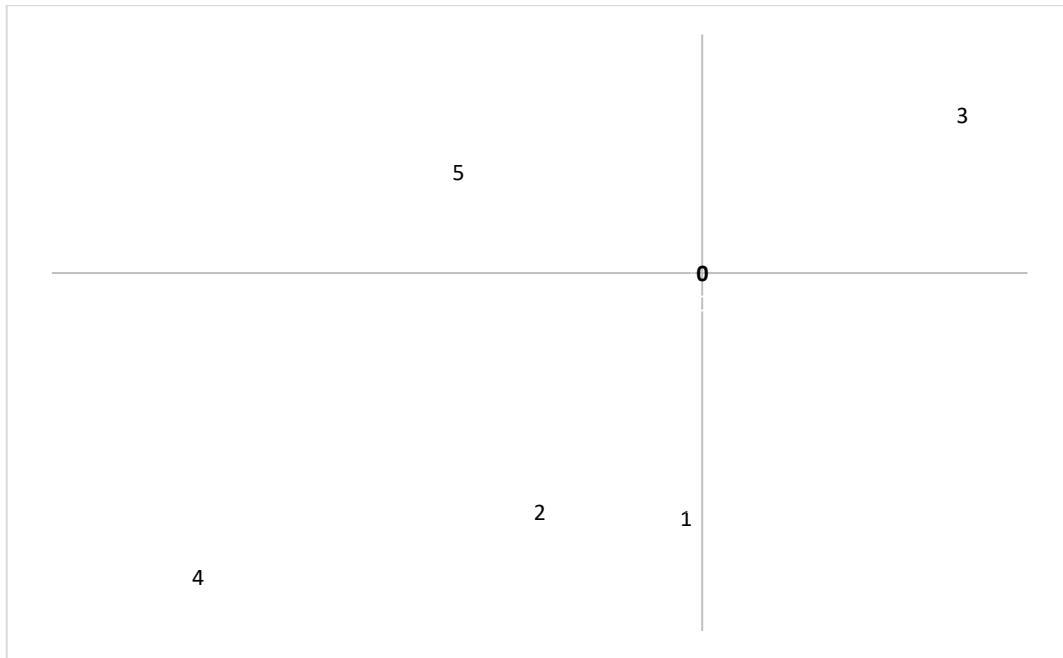
Fonte: elaborado pelo autor

Figura B.14 - Distribuição uniforme clientes e centro distribuição cenário 2 com 5 clientes**Fonte:** elaborado pelo autor**Tabela B.0.14 – Distâncias entre nós com distribuição uniforme no cenário 2 com 5 clientes**

D	0	1	2	3	4	5	6
0	0	35	66	59	25	35	0
1	35	0	101	46	60	69	35
2	66	101	0	118	42	31	66
3	59	46	118	0	78	89	59
4	25	60	42	78	0	11	25
5	35	69	31	89	11	0	35
6	0	35	66	59	25	35	0

Fonte: elaborado pelo autor

Figura B.15 - Distribuição uniforme clientes e centro distribuição cenário 3 com 5 clientes

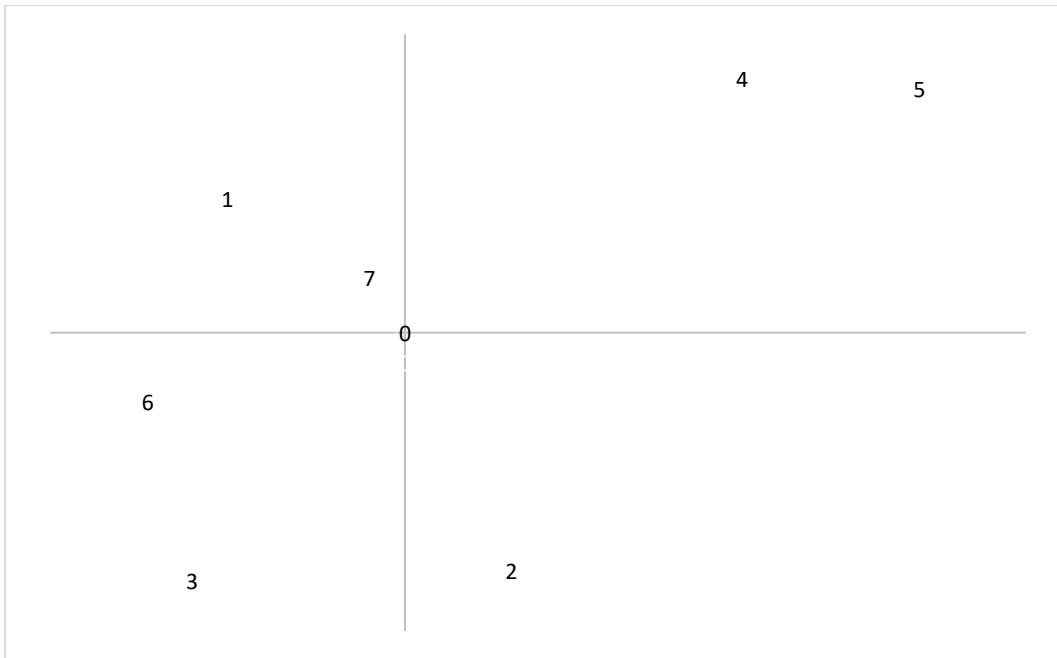


Fonte: elaborado pelo autor

Tabela B.0.15 – Distâncias entre nós com distribuição uniforme no cenário 3 com 5 clientes

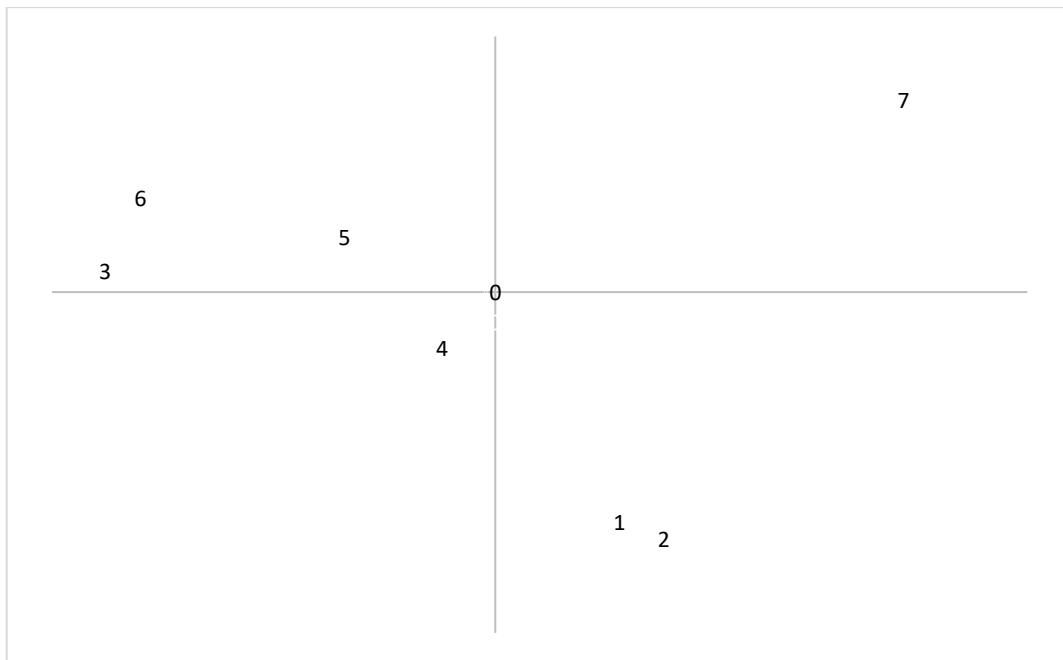
D	0	1	2	3	4	5	6
0	0	41	41	31	60	23	0
1	41	0	9	70	32	60	41
2	41	9	0	72	24	57	41
3	31	70	72	0	91	33	31
4	60	32	24	91	0	70	60
5	23	60	57	33	70	0	23
6	0	41	41	31	60	23	0

Fonte: elaborado pelo autor

Figura B.16 - Distribuição uniforme clientes e centro distribuição cenário 1 com 7 clientes**Fonte:** elaborado pelo autor**Tabela B.0.16 – Distâncias entre nós com distribuição uniforme no cenário 1 com 7 clientes**

D	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	0	34	49	55	64	76	32	12	0
1	34	0	82	77	63	81	42	23	34
2	49	82	0	36	102	107	53	61	49
3	55	77	36	0	119	129	36	64	55
4	64	63	102	119	0	20	93	58	64
5	76	81	107	129	20	0	107	73	76
6	32	42	53	36	93	107	0	35	32
7	12	23	61	64	58	73	35	0	12
8	0	34	49	55	64	76	32	12	0

Fonte: elaborado pelo autor

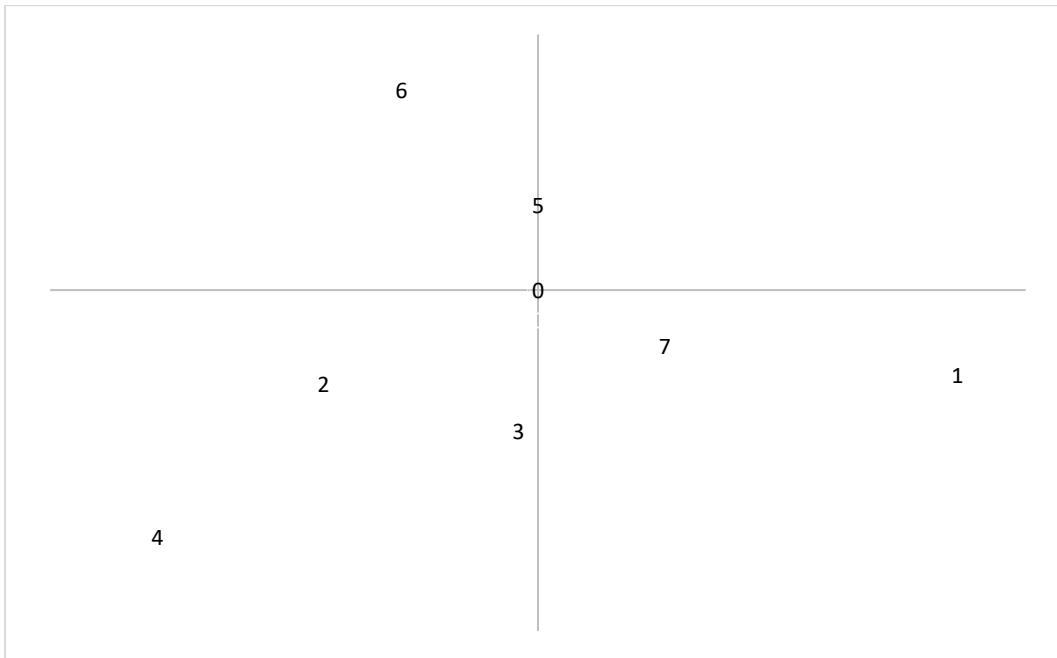
Figura B.17 - Distribuição uniforme clientes e centro distribuição cenário 2 com 7 clientes

Fonte: elaborado pelo autor

Tabela B.0.17 – Distâncias entre nós com distribuição uniforme no cenário 2 com 7 clientes

D	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	0	56	61	44	14	21	46	64	0
1	56	0	6	83	46	74	93	104	56
2	61	6	0	89	51	80	99	106	61
3	44	83	89	0	42	28	17	98	44
4	14	46	51	42	0	28	49	78	14
5	21	74	80	28	28	0	25	71	21
6	46	93	99	17	49	25	0	89	46
7	64	104	106	98	78	71	89	0	64
8	0	56	61	44	14	21	46	64	0

Fonte: elaborado pelo autor

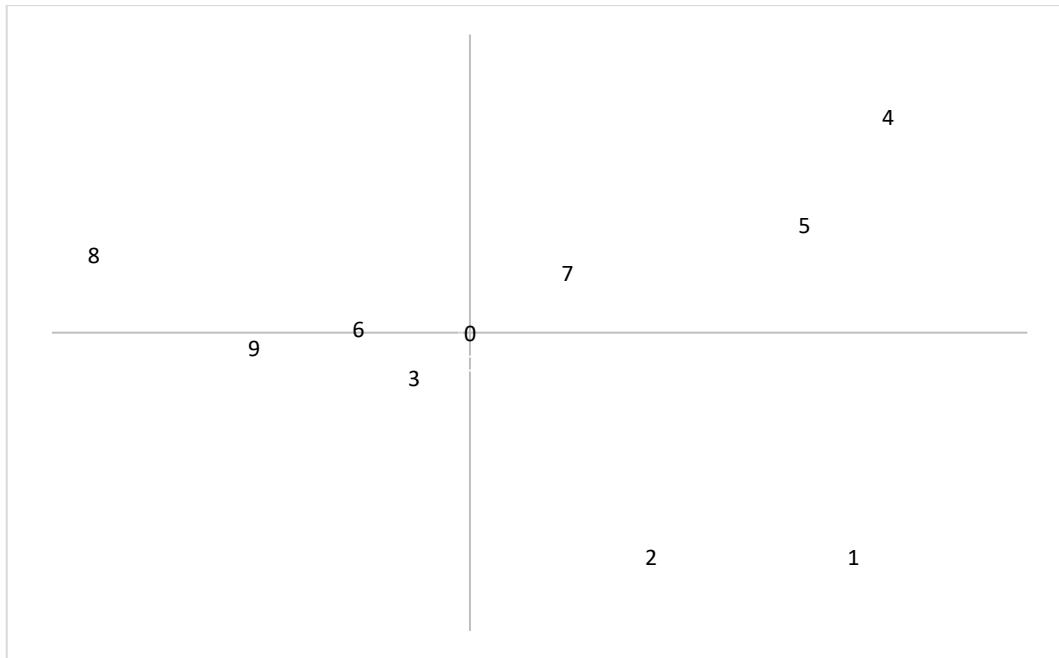
Figura B.18 - Distribuição uniforme clientes e centro distribuição cenário 3 com 7 clientes

Fonte: elaborado pelo autor

Tabela B.0.18 – Distâncias entre nós com distribuição uniforme no cenário 3 com 7 clientes

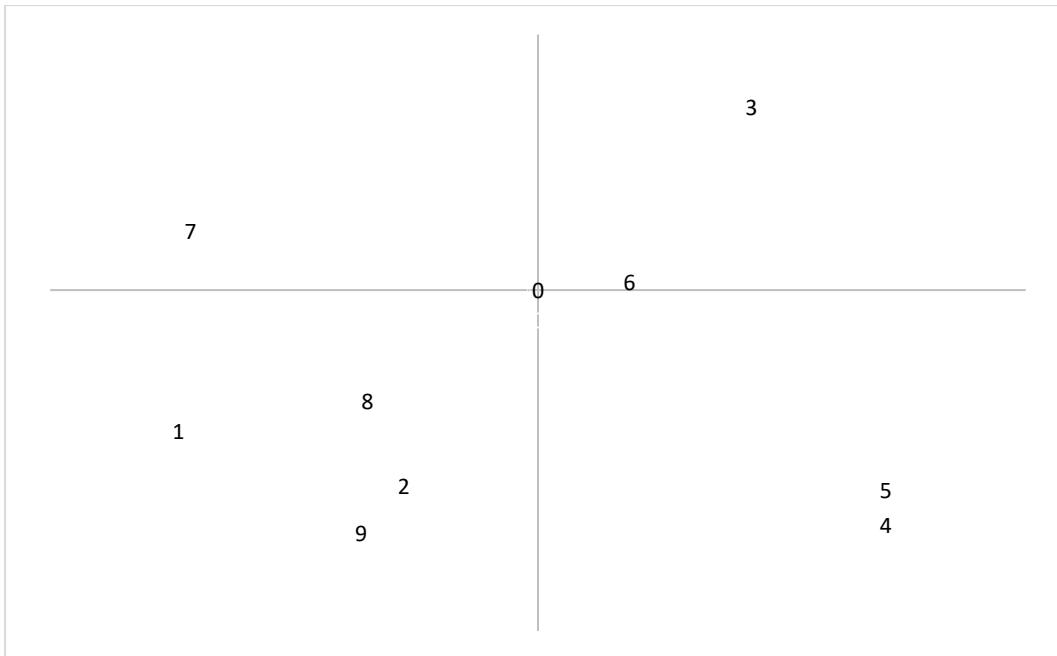
D	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	0	47	31	33	70	20	49	18	0
1	47	0	65	47	90	59	88	31	47
2	31	65	0	23	40	47	69	36	31
3	33	47	23	0	45	53	81	25	33
4	70	90	40	45	0	87	108	69	70
5	20	59	47	53	87	0	30	35	20
6	49	88	69	81	108	30	0	66	49
7	18	31	36	25	69	35	66	0	18
8	0	47	31	33	70	20	49	18	0

Fonte: elaborado pelo autor

Figura B.19 - Distribuição uniforme clientes e centro distribuição cenário 1 com 9 clientes**Fonte:** elaborado pelo autor**Tabela B.0.19 – Distâncias entre nós com distribuição uniforme no cenário 1 com 9 clientes**

D	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	81	65	14	83	56	16	21	58	31	0
1	81	0	29	79	118	89	94	86	136	103	81
2	65	29	0	59	123	92	74	77	114	80	65
3	14	79	59	0	98	69	15	36	57	24	14
4	83	118	123	98	0	31	95	62	120	110	83
5	56	89	92	69	31	0	70	36	102	86	56
6	16	94	74	15	95	70	0	34	43	16	16
7	21	86	77	36	62	36	34	0	68	49	21
8	58	136	114	57	120	102	43	68	0	34	58
9	31	103	80	24	110	86	16	49	34	0	31
10	0	81	65	14	83	56	16	21	58	31	0

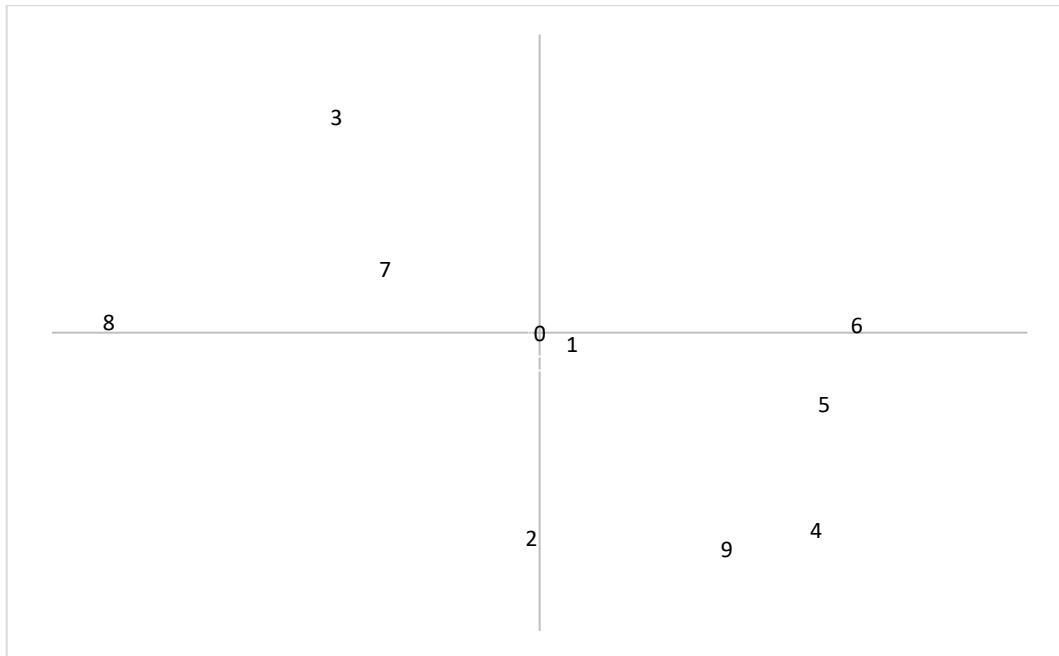
Fonte: elaborado pelo autor

Figura B.20 - Distribuição uniforme clientes e centro distribuição cenário 2 com 9 clientes**Fonte:** elaborado pelo autor**Tabela B.0.20 - Distâncias entre nós com distribuição uniforme no cenário 2 com 9 clientes**

D	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	68	51	55	79	74	15	59	38	64	0
1	68	0	39	121	118	117	82	47	32	38	68
2	51	39	0	106	80	79	61	69	21	13	51
3	55	121	106	0	100	93	46	96	93	119	55
4	79	118	80	100	0	8	71	133	90	86	79
5	74	117	79	93	8	0	65	129	88	87	74
6	15	82	61	46	71	65	0	73	51	74	15
7	59	47	69	96	133	129	73	0	49	76	59
8	38	32	21	93	90	88	51	49	0	31	38
9	64	38	13	119	86	87	74	76	31	0	64
10	0	68	51	55	79	74	15	59	38	64	0

Fonte: elaborado pelo autor

Figura B.21 - Distribuição uniforme clientes e centro distribuição cenário 3 com 9 clientes

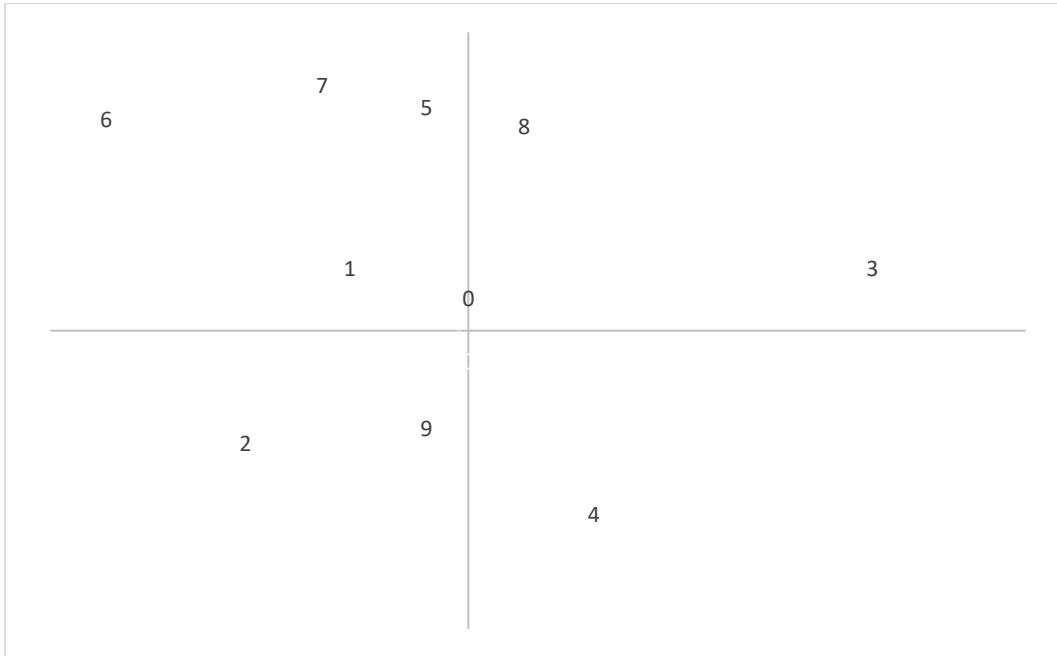


Fonte: elaborado pelo autor

Tabela B.0.21 – Distâncias entre nós com distribuição uniforme no cenário 3 com 9 clientes

D	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	5	55	63	63	40	39	25	53	62	0
1	5	0	52	68	58	35	35	30	57	58	5
2	55	52	0	116	35	51	70	74	78	24	55
3	63	68	116	0	126	98	85	41	62	126	63
4	63	58	35	126	0	34	55	88	103	12	63
5	40	35	51	98	34	0	21	65	91	41	40
6	39	35	70	85	55	21	0	60	92	62	39
7	25	30	74	41	88	65	60	0	37	86	25
8	53	57	78	62	103	91	92	37	0	97	53
9	62	58	24	126	12	41	62	86	97	0	62
10	0	5	55	63	63	40	39	25	53	62	0

Fonte: elaborado pelo autor

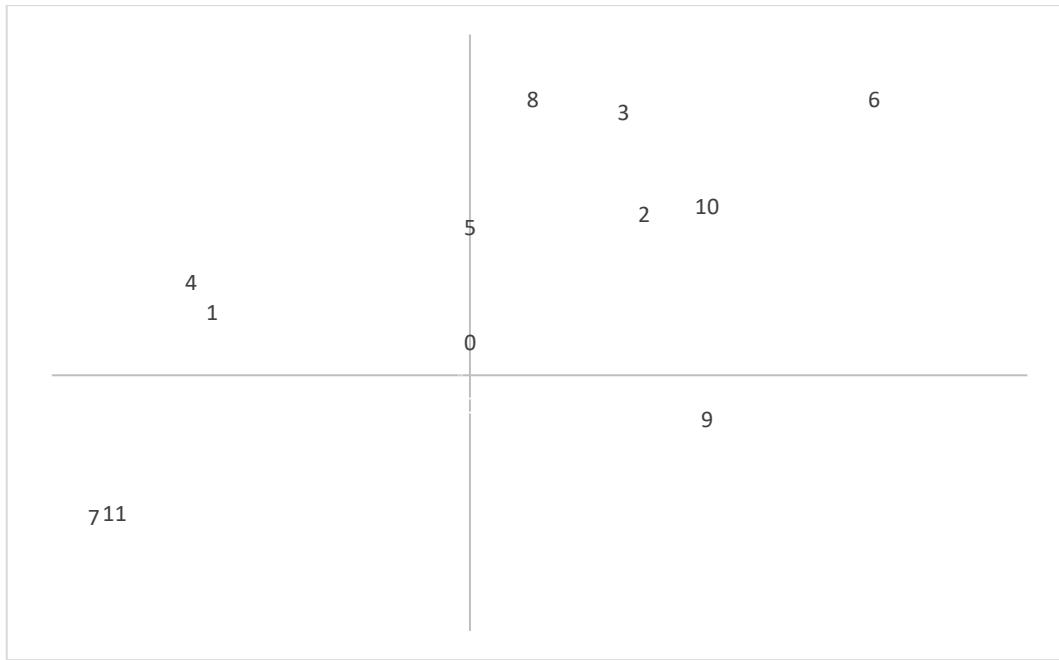
Figura B.22 - Distribuição uniforme clientes e centro distribuição cenário 1 com 11 clientes

Fonte: elaborado pelo autor

Tabela B.0.22 - Distâncias entre nós com distribuição uniforme no cenário 3 com 9 clientes

D	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	0	19	50	59	61	51	71	61	47	36	57	74	0
1	19	0	49	75	75	44	53	49	45	44	69	80	19
2	50	49	0	102	53	94	89	97	94	26	106	125	50
3	59	75	102	0	77	77	117	93	63	77	24	53	59
4	61	75	53	77	0	112	127	121	104	33	93	120	61
5	51	44	94	77	112	0	46	16	15	86	58	52	51
6	71	53	89	117	127	46	0	32	60	95	102	98	71
7	61	49	97	93	121	16	32	0	31	93	74	66	61
8	47	45	94	63	104	15	60	31	0	82	43	39	47
9	36	44	26	77	33	86	95	93	82	0	85	107	36
10	57	69	106	24	93	58	102	74	43	85	0	29	57
11	74	80	125	53	120	52	98	66	39	107	29	0	74
12	0	19	50	59	61	51	71	61	47	36	57	74	0

Fonte: elaborado pelo autor

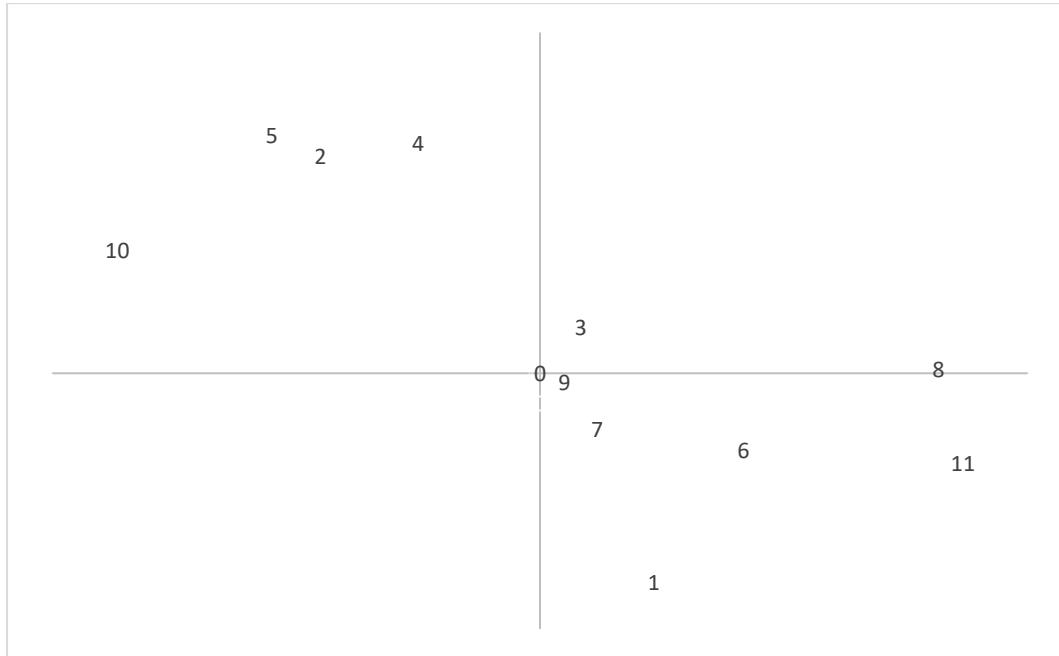
Figura B.23 - Distribuição uniforme clientes e centro distribuição cenário 2 com 11 clientes

Fonte: elaborado pelo autor

Tabela B.0.23 - Distâncias entre nós com distribuição uniforme no cenário 3 com 9 clientes

D	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	0	38	39	58	42	27	81	68	58	38	47	65	0
1	38	0	66	75	8	42	107	51	68	75	75	49	38
2	39	66	0	24	67	25	43	106	31	49	9	103	39
3	58	75	24	0	74	35	36	122	13	73	25	119	58
4	42	8	67	74	0	42	107	57	65	81	76	55	42
5	27	42	25	35	42	0	65	87	31	56	34	84	27
6	81	107	43	36	107	65	0	149	49	79	35	146	81
7	68	51	106	122	57	87	149	0	117	91	114	3	68
8	58	68	31	13	65	31	49	117	0	79	35	114	58
9	38	75	49	73	81	56	79	91	79	0	50	88	38
10	47	75	9	25	76	34	35	114	35	50	0	111	47
11	65	49	103	119	55	84	146	3	114	88	111	0	65
12	0	38	39	58	42	27	81	68	58	38	47	65	0

Fonte: elaborado pelo autor

Figura B.24 - Distribuição uniforme clientes e centro distribuição cenário 3 com 11 clientes

Fonte: elaborado pelo autor

Tabela B.0.24 - Distâncias entre nós com distribuição uniforme no cenário 3 com 9 clientes

D	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	0	51	58	12	56	65	31	15	49	4	60	56	0
1	51	0	108	61	107	115	33	37	61	48	102	47	51
2	58	108	0	51	12	8	86	72	91	61	33	107	58
3	12	61	51	0	47	59	35	24	45	13	60	57	12
4	56	107	12	47	0	18	82	71	83	59	45	101	56
5	65	115	8	59	18	0	94	80	99	68	33	115	65
6	31	33	86	35	82	94	0	19	31	27	90	27	31
7	15	37	72	24	71	80	19	0	44	12	72	46	15
8	49	61	91	45	83	99	31	44	0	46	105	22	49
9	4	48	61	13	59	68	27	12	46	0	63	53	4
10	60	102	33	60	45	33	90	72	105	63	0	115	60
11	56	47	107	57	101	115	27	46	22	53	115	0	56
12	0	51	58	12	56	65	31	15	49	4	60	56	0

Fonte: elaborado pelo autor

Apêndice C - Base de dados dos resultados

Este apêndice apresenta a base de dados gerada pelos testes, com todos os indicadores apresentados neste trabalho.

Tabela C.1 – Consolidação dos resultados dos experimentos

Experimento	Distribuição	Cenário	Número de Clientes	Velocidade	Autonomia	FO	Num drone	% drone	Tempo execução	Iterações
1	Exponencial	1	5	Sem drone	Sem drone	113,0	0	0,0%	0,14	4.063
2	Exponencial	1	5	40km/h	20min	113,0	0	0,0%	0,31	12.496
3	Exponencial	1	5	40km/h	40min	113,0	0	0,0%	0,31	11.889
4	Exponencial	1	5	80km/h	20min	113,0	0	0,0%	0,33	13.599
5	Exponencial	1	5	80km/h	40min	113,0	0	0,0%	0,41	11.063
6	Exponencial	2	5	Sem drone	Sem drone	261,0	0	0,0%	0,11	2.758
7	Exponencial	2	5	40km/h	20min	260,0	1	20,0%	0,13	3.742
8	Exponencial	2	5	40km/h	40min	247,0	1	20,0%	0,28	10.761
9	Exponencial	2	5	80km/h	20min	247,0	1	20,0%	0,25	10.794
10	Exponencial	2	5	80km/h	40min	247,0	1	20,0%	0,44	13.864
11	Exponencial	3	5	Sem drone	Sem drone	107,0	0	0,0%	0,14	4.038
12	Exponencial	3	5	40km/h	20min	106,0	1	20,0%	0,11	3.638
13	Exponencial	3	5	40km/h	40min	97,0	1	20,0%	0,20	8.086
14	Exponencial	3	5	80km/h	20min	97,0	1	20,0%	0,19	7.104
15	Exponencial	3	5	80km/h	40min	76,1	2	40,0%	1,20	19.821
16	Exponencial	1	7	Sem drone	Sem drone	278,0	0	0,0%	2,72	105.242
17	Exponencial	1	7	40km/h	20min	278,0	0	0,0%	3,19	112.194
18	Exponencial	1	7	40km/h	40min	274,0	1	14,3%	7,00	176.576
19	Exponencial	1	7	80km/h	20min	274,0	1	14,3%	5,75	136.195
20	Exponencial	1	7	80km/h	40min	253,8	2	28,6%	11,97	208.895
21	Exponencial	2	7	Sem drone	Sem drone	130,0	0	0,0%	2,36	82.976
22	Exponencial	2	7	40km/h	20min	129,0	1	14,3%	1,88	87.959
23	Exponencial	2	7	40km/h	40min	129,0	1	14,3%	5,19	118.481
24	Exponencial	2	7	80km/h	20min	129,0	1	14,3%	5,63	152.240
25	Exponencial	2	7	80km/h	40min	118,8	2	28,6%	23,17	273.732
26	Exponencial	3	7	Sem drone	Sem drone	610,0	0	0,0%	2,45	93.221
27	Exponencial	3	7	40km/h	20min	610,0	0	0,0%	3,31	131.157
28	Exponencial	3	7	40km/h	40min	610,0	0	0,0%	4,00	150.232
29	Exponencial	3	7	80km/h	20min	610,0	0	0,0%	3,47	127.832
30	Exponencial	3	7	80km/h	40min	610,0	0	0,0%	3,41	120.152
31	Exponencial	1	9	Sem drone	Sem drone	201	0	0,0%	158,80	7.995.414
32	Exponencial	1	9	40km/h	20min	201	1	11,1%	462,13	12.043.873
33	Exponencial	1	9	40km/h	40min	196	1	11,1%	1.116,98	13.986.733
34	Exponencial	1	9	80km/h	20min	196	1	11,1%	1.119,83	16.337.442
35	Exponencial	1	9	80km/h	40min	192	2	22,2%	1.853,00	16.010.009
36	Exponencial	2	9	Sem drone	Sem drone	137	0	0,0%	110,39	6.143.048
37	Exponencial	2	9	40km/h	20min	137	0	0,0%	150,00	7.406.828
38	Exponencial	2	9	40km/h	40min	131	1	11,1%	1.061,13	15.131.385
39	Exponencial	2	9	80km/h	20min	131	1	11,1%	826,06	11.968,008
40	Exponencial	2	9	80km/h	40min	103,3383	2	22,2%	2.127,27	17.096.861
41	Exponencial	3	9	Sem drone	Sem drone	376	0	0,0%	2.580,46	8.991,154
42	Exponencial	3	9	40km/h	20min	376	0	0,0%	127,11	6.866.387
43	Exponencial	3	9	40km/h	40min	371	1	11,1%	280,52	8.771.260
44	Exponencial	3	9	80km/h	20min	371	1	11,1%	298,58	12.213.145
45	Exponencial	3	9	80km/h	40min	369	2	22,2%	1.410,27	20.427.911

Experimento	Distribuição	Cenário	Número de Clientes	Velocidade	Autonomia	FO	Num drone	% drone	Tempo execução	Iterações
46	Uni	1	5	Sem drone	Sem drone	327	0	0,0%	0,11	2.850
47	Uni	1	5	40km/h	20min	327	0	0,0%	0,13	2.850
48	Uni	1	5	40km/h	40min	327	0	0,0%	0,11	2.850
49	Uni	1	5	80km/h	20min	327	0	0,0%	0,11	2.850
50	Uni	1	5	80km/h	40min	327	0	0,0%	0,11	2.850
51	Uni	2	5	Sem drone	Sem drone	266	0	0,0%	0,13	3.720
52	Uni	2	5	40km/h	20min	266	0	0,0%	0,13	3.720
53	Uni	2	5	40km/h	40min	266	0	0,0%	0,11	3.720
54	Uni	2	5	80km/h	20min	266	0	0,0%	0,11	3.720
55	Uni	2	5	80km/h	40min	266	0	0,0%	0,17	5.818
56	Uni	3	5	Sem drone	Sem drone	208	0	0,0%	0,16	4.958
57	Uni	3	5	40km/h	20min	208	0	0,0%	0,16	4.958
58	Uni	3	5	40km/h	40min	208	0	0,0%	0,16	4.958
59	Uni	3	5	80km/h	20min	208	0	0,0%	0,14	4.958
60	Uni	3	5	80km/h	40min	196	1	20,0%	0,34	15.041
61	Uni	1	7	Sem drone	Sem drone	329	0	0,0%	2,91	123.581
62	Uni	1	7	40km/h	20min	329	0	0,0%	2,92	123.581
63	Uni	1	7	40km/h	40min	324	1	14,3%	2,61	108.703
64	Uni	1	7	80km/h	20min	329	0	0,0%	2,91	123.581
65	Uni	1	7	80km/h	40min	324	1	14,3%	3,66	138.840
66	Uni	2	7	Sem drone	Sem drone	327	0	0,0%	2,99	118.721
67	Uni	2	7	40km/h	20min	327	0	0,0%	2,97	118.721
68	Uni	2	7	40km/h	40min	327	0	0,0%	2,99	118.721
69	Uni	2	7	80km/h	20min	327	0	0,0%	2,99	118.721
70	Uni	2	7	80km/h	40min	319,83	1	14,3%	5,25	156.535
71	Uni	3	7	Sem drone	Sem drone	300	0	0,0%	2,67	105.486
72	Uni	3	7	40km/h	20min	300	0	0,0%	2,66	105.486
73	Uni	3	7	40km/h	40min	300	0	0,0%	2,64	105.486
74	Uni	3	7	80km/h	20min	300	0	0,0%	2,66	105.486
75	Uni	3	7	80km/h	40min	300	0	0,0%	5,59	180.196
76	Uni	1	9	Sem drone	Sem drone	408	0	0,0%	134,39	7.557.268
77	Uni	1	9	40km/h	20min	408	0	0,0%	132,44	7.218.576
78	Uni	1	9	40km/h	40min	408	0	0,0%	142,67	7.642.758
79	Uni	1	9	80km/h	20min	408	0	0,0%	126,41	6.756.043
80	Uni	1	9	80km/h	40min	407	1	11,1%	477,42	13.912.694
81	Uni	2	9	Sem drone	Sem drone	420	0	0,0%	136,97	7.535.824
82	Uni	2	9	40km/h	20min	420	0	0,0%	91,16	5.193.598
83	Uni	2	9	40km/h	40min	420	0	0,0%	113,00	6.311.327
84	Uni	2	9	80km/h	20min	420	0	0,0%	127,97	6.603.144
85	Uni	2	9	80km/h	40min	416	1	11,1%	257,35	11.981.698
86	Uni	3	9	Sem drone	Sem drone	337	0	0,0%	145,78	5.971.017
87	Uni	3	9	40km/h	20min	337	0	0,0%	142,47	7.433.750
88	Uni	3	9	40km/h	40min	337	0	0,0%	239,41	9.616.785
89	Uni	3	9	80km/h	20min	337	0	0,0%	111,27	6.118.359
90	Uni	3	9	80km/h	40min	336	1	11,1%	298,88	10.843.360

Fonte: elaborado pelo autor