

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE
DRONES PARA DISTRIBUIÇÃO DE BOLSAS DE SANGUE: ESTUDO DE CASO
NO MUNICÍPIO DO RIO DE JANEIRO

Cairo Carvalho Campos Faria

2020



MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE
DRONES PARA DISTRIBUIÇÃO DE BOLSAS DE SANGUE: ESTUDO DE CASO
NO MUNICÍPIO DO RIO DE JANEIRO

Cairo Carvalho Campos Faria

Projeto de Graduação apresentado ao curso de Engenharia Civil da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. Glaydston Mattos Ribeiro

Rio de Janeiro
Março de 2020

MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE
DRONES PARA DISTRIBUIÇÃO DE BOLSAS DE SANGUE: ESTUDO DE CASO
NO MUNICÍPIO DO RIO DE JANEIRO

Cairo Carvalho Campos Faria

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE
ENGENHARIA CIVIL DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO
RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL.

Examinado por:

Glaydston Mattos Ribeiro, DSc.

Matheus Henrique de Sousa Oliveira, PhD.

Thayse Ferrari, MSc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO de 2020

Faria, Cairo Carvalho Campos

Modelagem matemática do problema de roteamento de drones para distribuição de bolsas de sangue: estudo de caso no município do Rio de Janeiro/ Cairo Carvalho Campos Faria – Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2020.

vii, 65 p.:il.; 29,7 cm.

Orientador: Glaydston Mattos Ribeiro

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Civil, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 39-45

1. Roteamento 2. Drones 3. Bolsas de sangue

I. Glaydston Mattos Ribeiro; II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Civil. III. Modelagem matemática do problema de roteamento de drones para distribuição de bolsas de sangue: estudo de caso no município do Rio de Janeiro

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Civil.

MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE
DRONES PARA DISTRIBUIÇÃO DE BOLSAS DE SANGUE: ESTUDO DE CASO
NO MUNICÍPIO DO RIO DE JANEIRO

Cairo Carvalho Campos Faria

Março de 2020

Orientador: Glaydston Mattos Ribeiro

Bolsas de sangue são importantes para a saúde da população. Armazenadas nos locais de coleta, essas bolsas precisam chegar aos hospitais em tempo reduzido, tendo em vista a urgência de certos casos. Sendo assim, existe a necessidade de se realizar uma distribuição de maneira otimizada. Esse processo normalmente considera o uso de veículos que sofrem diariamente problemas de atrasos devido ao trânsito das cidades. A fim de superar essa dificuldade, este trabalho tem como objetivo estudar um modelo matemático que permita a distribuição das bolsas por meio de drones, que são equipamentos pequenos, de fácil utilização e que independem das condições de tráfego de veículos. O modelo matemático de roteamento de drones foi implementado na linguagem Mosel com apoio do *solver* FICO Xpress. Um estudo de caso foi realizado na cidade do Rio de Janeiro considerando dados do Hemorio sobre todas as unidades que requerem bolsas de sangue diariamente. Constatou-se, através da análise de diversos cenários, que resultados ótimos podem ser encontrados para certos números de hospitais.

Palavras-chave: Roteamento; Drones; Bolsas de Sangue

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

MATHEMATICAL MODELING OF THE DRONE ROUTING PROBLEM FOR
BLOOD BAG DISTRIBUTION: CASE STUDY IN THE CITY OF RIO DE JANEIRO

Cairo Carvalho Campos Faria

March 2020

Adviser: Glaydston Mattos Ribeiro

Blood bags are important for the health of the population. Stored at collection sites, these bags need to arrive at the hospitals in a reduced time, having in mind the urgency of certain cases. Therefore, there is a need to perform an optimized distribution. This process is usually carried out through vehicles with daily delay problems due to city traffic congestion. In order to overcome such difficulty, this work aims to study a mathematical model that allows the distribution of the blood bags through drones, which are small equipment, easy to use and independent of traffic conditions. The drone routing mathematical model was implemented in the Mosel language with support of the FICO Xpress solver. A case study was carried out in the city of Rio de Janeiro, considering Hemorio data about all units that require blood bags daily. Through the analysis of scenarios, it was found that optimal results can be found for a certain amount of hospitals.

Keywords: Routing; Drones; Blood bags

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVOS	3
1.2	METODOLOGIA.....	3
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	4
2	CONCEITOS SOBRE O PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS E SUA RELAÇÃO COM O ROTEAMENTO DE DRONES	5
2.1	CARACTERÍSTICAS DE DRONES E EXEMPLOS DE USO NA ÁREA DA SAÚDE.....	5
2.1.1	Matternet.....	6
2.1.2	DHL.....	7
2.1.3	Zipline.....	8
2.1.4	Considerações sobre os exemplos	9
2.2	O PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS (PRV)	9
2.3	PRV E MODELOS MATEMÁTICOS ENVOLVENDO DRONES.....	13
3	MODELO MATEMÁTICO	17
3.1	CONJUNTOS, PARÂMETROS E VARIÁVEIS DE DECISÃO	17
3.2	FUNÇÕES OBJETIVO E RESTRIÇÕES	19
4	ESTUDO DE CASO	25
4.1	DADOS DE ENTRADA	26
4.2	CENÁRIOS	29
4.2.1	Cenário C1.....	31
4.2.2	Cenário C2.....	32
4.2.3	Cenário C9.....	34
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES.....	37
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39
	APÊNDICE A – RESULTADOS DOS CENÁRIOS.....	46
	ANEXO A – LISTA DE HOSPITAIS	56

1 INTRODUÇÃO

Transfusões de sangue salvam vidas. Como indica o Ministério da Saúde (2019), esses procedimentos são realizados em diferentes circunstâncias, muitas vezes em situações de urgência, como transplantes, cirurgias ou partos em que há muita perda de sangue. Também são necessárias para o tratamento de doenças crônicas graves, casos em que o paciente precisará de transfusões periódicas durante toda vida.

Quaisquer que sejam os motivos, o tempo é um fator determinante quando se trata de transfusão, como mostra Zimmerman (2007). Portanto, o sangue sempre deve estar à disposição dos pacientes quando necessário. Ele é obtido através de doações da população e o armazenamento é feito em centros de coleta, onde é, então, distribuído para os hospitais. De acordo com o Ministério da Saúde (2019), a doação de uma pessoa, que equivale a uma bolsa de sangue, pode salvar até quatro vidas. Percebe-se, assim, como é fundamental que essas bolsas alcancem a população necessitada.

No Brasil, segundo o Caderno de Informação - Sangue e Hemoderivados, disponibilizado pelo Ministério da Saúde (2018), 1,6% da população doou sangue em 2016. Este valor, por ser maior que 1%, é aceitável de acordo com padrões estabelecidos pela Organização Mundial da Saúde (OMS), ainda que se encontre aquém do esperado pelo Ministério da Saúde (2018). Existem, ainda, variações de acordo com a região e estado. No estado do Rio de Janeiro, por exemplo, o resultado está abaixo do mínimo esperado, com doações sendo feitas por apenas 0,75% da população.

Além disso, percebe-se que, hoje, na capital, há mais pessoas que podem precisar de transfusões e menos locais em que esse procedimento possa acontecer. Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2019), a cidade teve uma taxa de crescimento populacional, entre 2010 e 2018, de 5,82%. Em contrapartida, no mesmo período o Conselho Federal de Medicina (CFM, 2018) constatou que o número de leitos disponíveis de internação pelo Sistema Único de Saúde (SUS) diminuiu 30,1%. Torna-se, então, imprescindível que a entrega de bolsas de sangue seja feita de maneira otimizada, a fim de atender todos os pacientes com a maior rapidez possível, viabilizando, assim, o atendimento dos próximos.

Atualmente, no estado do Rio de Janeiro, o modelo de distribuição de sangue tem suas operações centralizadas no Hemorio, hemocentro coordenador da Hemorrede estadual (HEMORIO, 2018). Os hospitais públicos devem informar individualmente a sua demanda ao

mesmo e então enviar ambulância própria para recolhê-la. Entretanto, considerando os problemas de congestionamento na cidade, essa maneira pode não ser a mais eficiente.

Em um estudo realizado por Reed e Kidd (2019), constatou-se que o Rio de Janeiro é a sétima cidade mais congestionada do mundo, com um total de 199 horas perdidas anualmente devido ao trânsito. Além disso, o número de veículos na capital continua crescendo ano após ano, como mostra o gráfico do IBGE (2019) apresentado na Figura 1.1. Assim, o problema do trânsito tende a aumentar.

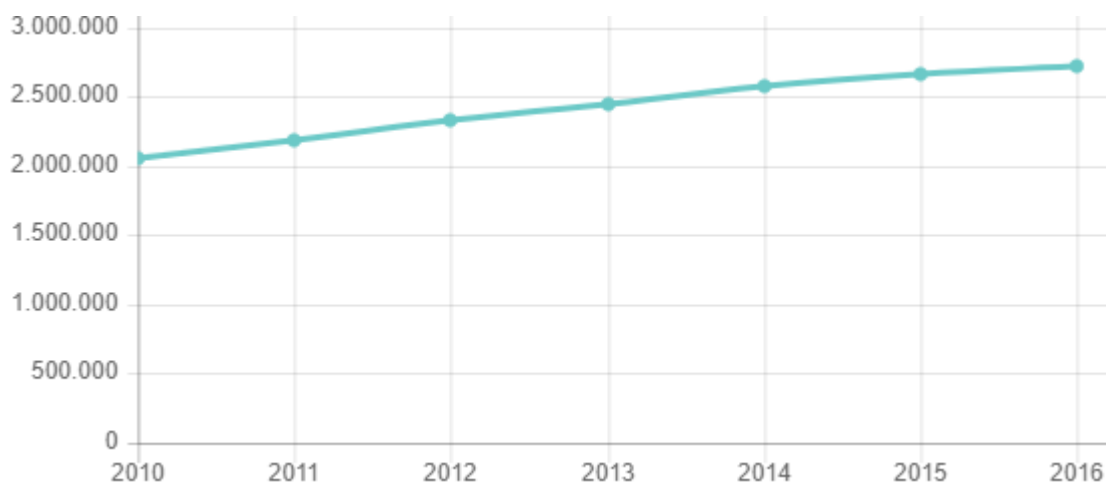


Figura 1.1 – Número de veículos no município do Rio de Janeiro (IBGE, 2019).

Uma maneira de resolver o problema de distribuição de bolsas de sangue no Rio de Janeiro, evitando as ocorrências de congestionamento, é por meio da utilização de drones. Também conhecidos como veículos aéreos não tripulados (UAV), versões pequenas dessa aeronave, controladas a distância e com rotas pré-programadas, poderiam ser utilizadas para o transporte entre o centro de distribuição e os hospitais da cidade. Com isso, dependendo da capacidade de carga do drone, da sua autonomia de voo e da demanda dos hospitais, um drone poderia fazer a entrega de bolsas de sangue a mais de um hospital, por meio de uma rota, ou seja, uma sequência predefinida de atendimento. Esse problema é conhecido como *Drone Delivery Problem (DDP)* (Dorling *et al.*, 2017) e tem características do clássico Problema de Roteamento de Veículos (PRV), proposto inicialmente por Dantzig e Ramser (1959).

Adventos tecnológicos conquistados nos últimos permitem que essa hipótese se torne viável. Afinal, a resistência ao impacto, capacidade de carga e a autonomia de voo de drones apresentaram um crescimento nesse período (FLOREANO e WOOD, 2015). Hoje, também é possível integrá-los ao sistema de posicionamento global (GPS) e a aplicativos computacionais de rastreamento, permitindo que voos autônomos aconteçam e melhores rotas sejam escolhidas,

como mostra Floreano e Wood (2015). Dessa maneira, a incorporação dessa tecnologia nos deslocamentos urbanos atualmente parece promissor.

Isso já é uma realidade em alguns lugares do mundo, envolvendo, inclusive, a área da saúde. A empresa suíça Matternet, por exemplo, realiza operações de transporte de materiais biológicos entre dois hospitais na cidade de Lugano, Suíça, utilizando essa tecnologia (MATERNET, 2019).

O estudo do transporte de bolsas de sangue via drones torna-se, então, importante, pois possibilitaria uma eficiência maior na entrega. Como existem vários pontos de demanda, rotas poderiam ser criadas. Afinal, isso implicaria em redução de custos e, principalmente, redução do tempo necessário para entregas. Portanto, é importante que seja realizado um estudo para otimização dessas rotas.

1.1 OBJETIVOS

Esse trabalho tem como objetivo apresentar um modelo matemático de otimização, com apoio de uma linguagem de modelagem, para definição de rotas de transporte aéreo via drones para a distribuição de bolsas de sangue, tendo como estudo de caso o município do Rio de Janeiro.

Como objetivo específico, procura-se avaliar o desempenho do modelo para diferentes cenários elaborados com base na cidade do Rio de Janeiro.

1.2 METODOLOGIA

Utilizando informações reunidas por Haddad e Pimenta (2019), foi obtida a lista de hospitais públicos da capital, assim como suas coordenadas geográficas e a distância aérea entre eles. Em seu trabalho, os autores também estimaram a demanda diária de sangue de cada hospital a partir de dados fornecidos pelo Hemorio (2018).

Foi realizada, então, uma pesquisa bibliográfica que buscou definir conceitos importantes para o problema, como drones, o PRV e a relação entre eles. Procurou-se, também, encontrar um modelo matemático para ser incorporado ao trabalho e o proposto por Dorling *et al.* (2017) se destacou por otimizar o uso de baterias e apresentar a realização de múltiplas viagens. Esse modelo foi, então, adaptado para o problema em questão.

Após sua definição, realizou-se uma implementação na linguagem de otimização Mosel (FICO Xpress, 2008). A partir desse momento, testes computacionais foram realizados em

maquinas especificas do Laboratório de Sistemas de Informações Geográficas e Otimização da COPPE/UFRJ, a fim de encontrar os resultados desejados. Diversos cenários foram criados com base nas características dos drones e nas regiões da cidade. E, com todos os resultados obtidos, análises foram realizadas.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Além deste capítulo introdutório, este trabalho apresenta mais quatro capítulos. O Capítulo 2 apresenta conceitos sobre roteamento de veículos e sobre drones, para melhor compreensão do problema de roteamento de drones, assim como exemplos de aplicações desses equipamentos na área da saúde. O Capítulo 3 apresenta o modelo matemático utilizado, com seus conjuntos, parâmetros e variáveis de decisão. O Capítulo 4 apresenta o estudo de caso e os resultados dos testes com diferentes cenários. Por último, o Capítulo 5 apresenta as conclusões finais e sugestões de trabalhos futuros.

2 CONCEITOS SOBRE O PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS E SUA RELAÇÃO COM O ROTEAMENTO DE DRONES

Como apresentado no Capítulo 1, o problema de roteamento de drones para entrega de bolsas de sangue tem características do Problema de Roteamento de Veículos (PRV). Assim, este capítulo apresenta inicialmente as características principais dos drones e suas aplicações na área da saúde. Em seguida, conceitos sobre o PRV que são importantes para o entendimento deste trabalho são então discutidas e, por último, apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre modelos matemáticos envolvendo o roteamento de drones.

2.1 CARACTERÍSTICAS DE DRONES E EXEMPLOS DE USO NA ÁREA DA SAÚDE

O drone, nome popular do *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV), é definido como uma aeronave que voa sem piloto a bordo e pode ser inteiramente controlada de maneira remota ou de forma autônoma. Essa definição é dada pela agência *International Civil Aviation Organization* (ICAO), órgão das Nações Unidas que busca padronização na indústria de aviação.

Como a definição é ampla, a aeronave pode possuir diversas formas, de maneira que diferentes tipos de classificação possam ser feitos, seja levando em conta o peso do equipamento, sua atividade fim, ou outras características. Considerando o mecanismo de voo utilizado, a *Civil Aviation Safety Authority* (CASA) (2020) do Governo Australiano propôs a seguinte classificação:

- Helicópteros monorotores: Similar a um helicóptero, possui apenas um rotor principal (nome técnico da hélice) e, normalmente, outro menor na calda. Consegue decolar e pousar verticalmente;
- Helicópteros multirotores: Possui mais de um rotor, muitas vezes quatro, quadricóptero, ou seis, hexacóptero. Também voa de maneira parecida a um helicóptero;
- Aeroplanos: Com asas fixas, se parece com e voa tal qual um avião. Decola horizontalmente e não pode pairar no ar;
- *Powerd lift*: Se move horizontalmente como um avião, mas consegue decolar e pousar na vertical, pois também possui rotores; e
- Dirigível: Pode ser preenchido com gases e flutua no ar, mas também possui motor que permite o deslocamento horizontal.

Acerca dos três primeiros tipos, Demolinari (2016) descreveu os principais componentes como sendo: estrutura (corpo do drone); motores; controladores de velocidade; controladores de voo; hélices (rotores); e baterias. Todos esses elementos influenciam no *payload*, ou seja, quantidade de carga extra que pode ser transportada pela aeronave. Entretanto, apenas as duas últimas características são abordadas nesse trabalho.

Atualmente, existem diversas aplicações para o uso de drones, como mostra um estudo realizado pela PricewaterhouseCoopers (PwC, 2016), desde de segurança até entretenimento. Destaca-se, neste trabalho, a utilização desses equipamentos para entregas relacionadas a área da saúde. Por esse motivo, são listadas, a seguir, situações reais desse tipo de aplicação, realizadas pelas empresas Matternet, DHL e Zipline.

2.1.1 Matternet

A empresa Matternet tem longo histórico de entregas de medicamentos através de drones autônomos, trabalhando em conjunto com a *United Nations Children's Fund* (UNICEF) e Médicos Sem Fronteiras. Já prestou serviços no Haiti, após o terremoto de 2010, assim como no Butão e em Nova Guiné. Os equipamentos usados nesses casos poderiam carregar até 2 kg, atingir uma distância de até 10 km e voar a 40 km/h. As rotas foram geradas automaticamente pelos drones, levando em conta terreno, clima e espaço aéreo (SCOTT e SCOTT, 2020).

Além de realizar esse tipo de transporte em lugares de difícil acesso, a empresa também foi a primeira a fazer isso em áreas urbanas. Em parceria com a Swiss Post, na Suíça, desde 2017, já existe transporte de materiais biológicos através de drones entre hospitais, facilitando entregas urgentes. Essas entregas são feitas de ponta-a-ponta, de modo que o drone sai do centro de distribuição em direção ao destino e, então, retorna. Nelas, são usados quadricóptero (veja Figura 2.4), novamente com sistema de auto pilotagem. Voam distâncias de até 20 km, carregando até 2 kg, a 36 km/h. Os carregamentos das entregas são feitos automaticamente através de estações de base, após o escaneamento de um código de barras presente no veículo. Nessas estações, também ocorre o recarregamento da bateria (MATTERNET, 2019).

Testes com o modelo aplicado na Suíça também serão realizados em San Diego, EUA, no ano de 2020. O programa conta como uma colaboração entre Matternet, a empresa de logística UPS e a Universidade da Califórnia, e visa aumentar a eficiência, confiabilidade e

previsibilidade das entregas de amostras hospitalares entre laboratórios e hospitais (LAFEE, 2020).



Figura 2.4 – Quadricóptero decolando em sua estação de base (SWISS POST, 2020).

2.1.2 DHL

A DHL, empresa alemã, realizou seus primeiros testes de entrega medicinais por meio de drones em seu país de origem no ano de 2013. Nestes experimentos, desempenhados por um quadricóptero de controle manual, com capacidade de carga de 1,2 kg e velocidade 43 km/h, o maior obstáculo era atravessar um rio, alcançando uma distância de 1 km. Em 2014, o novo desafio foi atravessar o mar aberto, atingindo a ilha de Juist, na Alemanha, a 12 km de distância, agora com um quadricóptero de controle autônomo. Para alcançar maiores velocidades, em 2016, o modelo de drone que passou a ser utilizado foi do tipo *tiltwing*, espécie de aeronave do tipo *powerd lift* que possui asas com rotores acoplados e que é capaz de inclinar ambos juntos. Apto a atingir distâncias de até 8,3 km, com uma velocidade de 70 km/h e carga de 2 kg, os testes com esse equipamento foram feitos em região montanhosa, realizando entregas ponta-a-ponta de medicamentos urgentes, assim como equipamentos esportivos (DHL, 2016).

O novo salto de capacidade se deu em 2018, quando a empresa se aliou a GIZ, representante de órgão federal alemã, e a fabricante Wingcopter, para desempenhar um projeto no continente africano. Sobre o lago Vitória, na região da Tanzânia, foram registrados mais de 180 decolagens, totalizando 2200 km voados em 2000 minutos, durante um período de seis

meses. A aeronave utilizada dessa vez foi do tipo *tiltrotor*, modelo de *power lift* com asas fixas e rotores com capacidade de inclinação, como mostra a Figura 2.5. Esse equipamento suporta cargas de até 4 kg, e atinge distâncias de 65 km com uma velocidade de 130 km/h, conseguindo fazer o percurso da ilha de Ukerewe até o centro médico mais próximo em 40 minutos (DHL, 2019).



Figura 2.5 – Drone *tiltrotor* em viagem (WINGCOPTER, 2020).

2.1.3 Zipline

A empresa americana Zipline também se destaca no ramo de ajuda humanitária, atuando em Ruanda desde de 2016. Possui, hoje, dois centros de distribuição no país e transporta, através de entregas ponta-a-ponta, principalmente, bolsas de sangue e medicamentos. Até abril de 2019, já registrava mais de 13 mil entregas, sendo, um terço dessas, para casos urgentes (LEON, 2019).

Também em 2019, os serviços foram expandidos para Gana, com planos de atender dois mil hospitais e beneficiar mais de 12 milhões de pessoas. Nessa operação, quatro centros de distribuição serão instalados, cada um equipado com 30 drones e serviço disponível 24 horas por dia (LEON, 2019).

Os drones utilizados nessas entregas, também feitas de ponta-a-ponta, possuem asas fixas, com um visual similar ao de um pequeno avião (veja Figura 2.6). Eles são lançados a partir de catapultas e, quando chegam no destino, soltam a carga levada, que chega ao solo com um auxílio de um pequeno paraquedas. A capacidade de carga é de 1,75 kg, atinge distâncias de até 80 km, trajeto que faz em 45 minutos. A bateria se destaca como o equipamento mais pesado

do drone, sendo assim fator que impede que maiores distâncias e velocidades sejam atingidas com a tecnologia atual (ACKERMAN e KOZIOL, 2019).



Figura 2.6 – Drone realizando entrega (ZIPLINE, 2020).

2.1.4 Considerações sobre os exemplos

Nos casos citados, percebe-se que a maioria das entregas se dá em áreas de difícil acesso, com poucas atuações em áreas urbanas. Além disso, todas as entregas descritas são feitas de ponta-a-ponta, de modo que o mesmo drone não atende múltiplos clientes em uma mesma rota. Percebe-se então, que o uso de roteamento de drones não foi colocado em prática por essas empresas ainda.

2.2 O PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS (PRV)

O PRV representa uma categoria de problemas cujo objetivo é encontrar as rotas de menor custo para realização de entregas ou coletas feitas por uma frota de veículos. Essas atividades (entrega ou coleta) devem ocorrer entre um ou mais centros de distribuição e os diversos clientes, dispostos em diferentes posições geográficas. Também estão sujeitas a uma série de restrições, tais como um intervalo de tempo para que a entrega seja realizada e uma

capacidade máxima de carga que pode ser suportada por cada veículo. Trata-se de uma generalização do clássico Problema do Caixeiro Viajante, no qual um caixeiro viajante sai de uma cidade para visitar outras e então retorna ao ponto inicial, sendo que cada cidade intermediária só pode ser visitada uma única vez.

Como mencionado no Capítulo 1, o PRV foi proposto pela primeira vez por Dantzig e Ramser (1959), analisando a situação real de entrega de combustível feita por caminhões homogêneos a partir de um depósito, destinada a atender a demanda de múltiplos postos de gasolina. Poucos anos depois, Clarke e Wright (1964) estenderam essa situação, de modo que fosse aplicável à logística de transportes em geral como um problema de otimização. Estudos acerca desse problema, incluindo novas restrições, continuaram a crescer ao longo dos anos, em grande parte devido ao avanço computacional, como é possível observar na Figura 2.1.

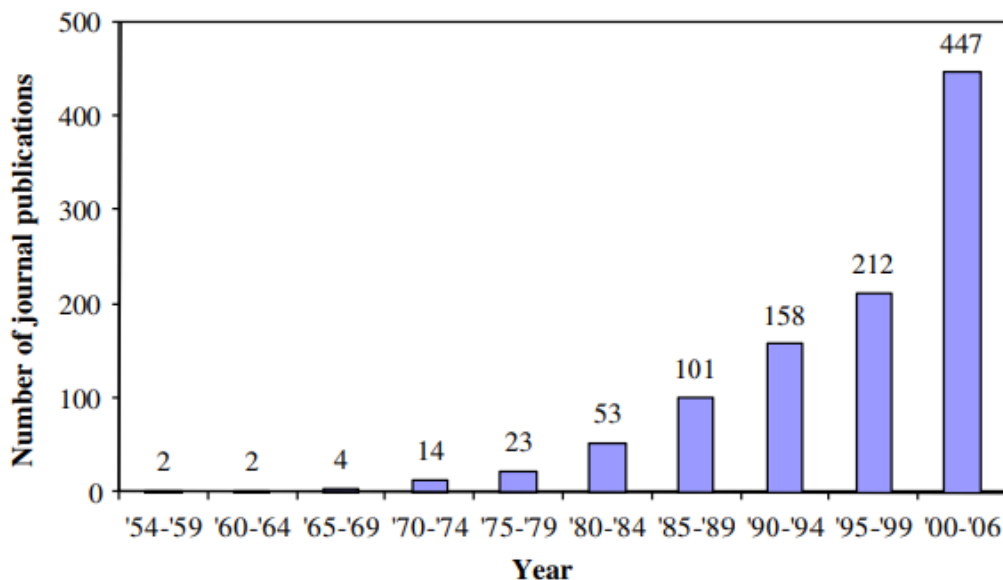


Figura 2.1 – Número de publicações de artigos sobre PRV ao longo dos anos (EKSIUGLU *et al.*, 2009).

Este aumento é justificado pela importância econômica que a resolução do problema possui. Conforme Toth e Vigo (2002), o estudo de técnicas computacionais para solucionar o PRV pode resultar em uma economia que varia entre 5% e 20% dos gastos relacionados ao transporte. Além disso, a grande variedade de aplicações e possibilidades de se encontrar novas e melhores soluções também motivam pesquisadores a estudar o assunto.

Entre as aplicações, cita-se principalmente o setor de operações logísticas, com grandes empresas privadas utilizando aplicativos computacionais para a resolução do PRV, seja para, por exemplo, serviços de distribuição diária de alimentos ou transporte de itens de valor. Além

da redução de custos, o investimento nessa área também visa atender as crescentes expectativas do consumidor, como mostra Partyka *et al.* (2014).

Essa classe de problemas é considerada NP-Hard, como classificou Lenstra *et al.* (1981). Isso significa que é necessário um grande esforço computacional para a obtenção de soluções ótimas, tornando-as mais plausíveis em casos com poucos pontos de demanda. Nos problemas de maiores escalas (com mais de 100 pontos), é comum a utilização de métodos heurísticos que, apesar de não trazerem resultados exatos, encontram soluções boas em um tempo computacional reduzido.

Na versão clássica do PRV, busca-se encontrar as rotas de menor custo atendendo a duas características básicas, segundo Laporte (1992): todos os veículos devem iniciar e terminar suas rotas no depósito; e cada cliente deve ser visitado uma única vez por apenas um veículo. Este problema pode ser, assim, representado de forma gráfica pela Figura 2.2, evidenciando o seu formato de “flor”, como foi demonstrado por Rego (1992). É possível observar que o depósito (quadrado com código 0), onde os três veículos começam e terminam suas rotas, representa o “caule”. As três rotas por eles realizadas, indicadas pelos diferentes tipos de linha, saem do depósito, passam pelos clientes numerados, localizados nos vértices e retratados como círculos, e então retornam ao ponto de início, formando assim as pétalas.

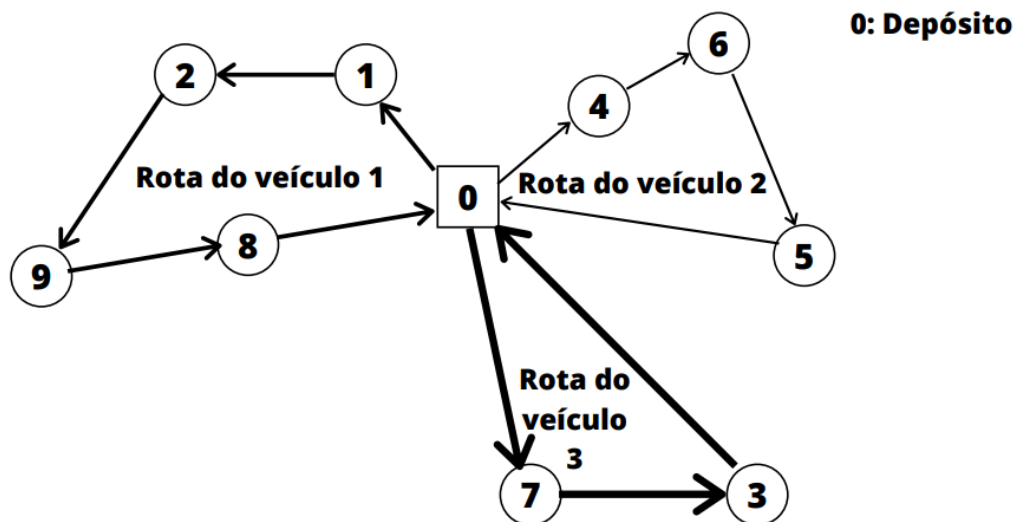


Figura 2.2 – Representação do PRV (Adaptado de OTURAKÇI, 2014).

Em aplicações práticas, como a proposta neste trabalho, outras restrições são adicionadas ao problema, o que pode mudar também sua representação. Assim, os diferentes tipos de PRV relevantes para o presente trabalho são apresentados no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 – Variações de PRV

Variação de PRV	Definição	Trabalhos sobre
Problema de Roteamento de Veículos Capacitado (PRVC)	Versão básica do PRV que considera uma frota de veículos idênticos, em que a soma das demandas dos consumidores em cada rota não ultrapassa a capacidade do veículo que a realiza.	BALDACCI et al. (2010) e FUKASAWA et al. (2006);
Problema de Roteamento de Veículos com Janelas de Tempo (PRVJT)	É uma combinação dos problemas de agendamento e de roteamento de veículos. Tem como nova restrição atender cada cliente dentro de um intervalo de tempo pré-determinado.	SOLOMON (1987), LAU et al. (2003) e BRÄYSY e GENDREAU (2005);
Problema de Roteamento de Veículos com Frota Heterogênea (PRVFH)	Em contraponto ao PRV original, possibilita o uso de tipos diferentes de veículos, cada um com sua capacidade de carga e custo associado.	GOLDEN et al. (1984), BALDACCI et al. (2008) e KOÇ et al. (2016);
Problema de Roteamento de Veículos com Restrição de Tempo (PRVRT)	Neste problema, existe um limite de tempo de viagem associado a cada rota, normalmente também ligado a uma distância máxima que possa ser percorrida por cada veículo.	MALANDRAKI e DASKIN (1992) e ICHOUA et al. (2003);
Problema de Roteamento de Veículos com Coleta e Entrega (PRVCE)	Ao longo da rota, haverá pontos em que o veículo deverá efetuar entregas, e outros em que ele deverá efetuar coletas.	CHEN e WU (2006) e SUBRAMANIAN et al. (2010);
Problema de Roteamento de Veículos com Múltiplos Depósitos (PRVMD)	Conta com mais de um depósito disponível para atender os clientes, de modo que estes sejam, normalmente, associados ao depósito mais próximo.	RENAUD et al. (1996) e VIDAL et al. (2014); e

Variação de PRV	Definição	Trabalhos sobre
Problema de Roteamento de Veículos com Múltiplas Viagens (PRVMV)	Possibilita que cada veículo, após completar sua rota e retornar ao depósito, possa realizar uma nova rota, atendendo novos clientes, que continuam sendo visitados por apenas um veículo. Dessa forma, uma frota menor de veículos se torna possível, gerando uma economia. A Figura 2.3 mostra uma representação desse problema. Nela, com o depósito novamente sendo representado por um quadrado de código zero, os clientes por círculos numerados e as rotas de cada veículo por três diferentes tipos de linha, é possível observar que, diferente da Figura 2.2, os Veículos 1 e 3 realizaram duas rotas cada.	FLEISCHMANN (1990), MINGOZZI et al. (2012) e AYADI e BENADADA (2013).

Percebe-se assim que o PRV e suas variantes, apresentadas acima, surgem em diversas aplicações práticas, principalmente nas empresas transportadoras que trabalham em áreas urbanas.

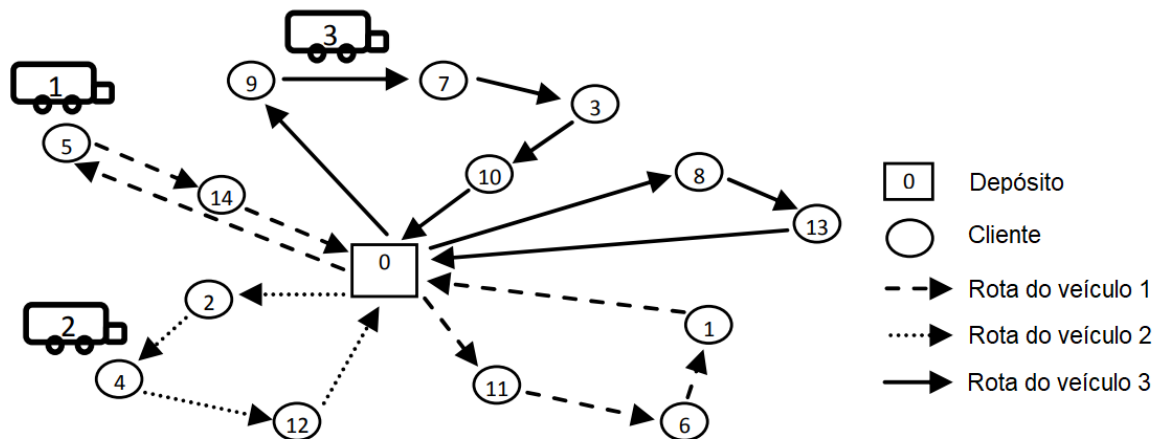


Figura 2.3 – Representação do PRVMV (Adaptado de AYADI e BENADADA, 2013).

2.3 PRV E MODELOS MATEMÁTICOS ENVOLVENDO DRONES

Diferente dos PRVs apresentado na Seção 2.1, as rotas realizadas por meio de drones independem do sistema viário das cidades. A trajetória entre dois pontos de entrega é feita em linha reta pelo drone, por representar a menor distância. Esta simplificação apresentada é

cercada, porém, por outras questões que precisam ser consideradas no transporte via drones, sendo que algumas delas não são comuns na literatura sobre PRV.

Os drones apresentam uma restrição de tempo, devido ao limite imposto pela duração das baterias. Por outro lado, o consumo da energia das baterias varia conforme alguns fatores como o peso próprio da aeronave, o *payload*, o peso da bateria, o número de rotores, a área gerada pelo giro de cada um deles e a densidade do ar. Isso faz com o clima também seja um fator determinante para entregas envolvendo drones. Obstáculos como montanhas, prédios, ou até mesmo limites de espaço aéreo devem ser igualmente considerados em situações reais

Entre os trabalhos feitos sobre o assunto, Otto *et al.* (2018) apresenta diferentes usos para a otimização de rotas envolvendo drones, como, por exemplo, segurança, agricultura e, é claro, transporte. Acerca deste último, diversos estudos, como Schermer *et al.* (2018), consideram a utilização de caminhões associados ao transporte por drones, de modo que, enquanto a carreta faz sua rota, os veículos de transporte aéreo a utilizam como depósito, saindo deles em direção aos clientes e, então, retornando aos mesmos.

Outros trabalhos, como Jiang *et al.* (2017), não consideram essa associação com outros veículos, levando em conta apenas o uso de drones. Nesse trabalho, os autores elaboraram um modelo de atribuição de tarefas para drones através do PRVJT, levando em conta, ainda, outras restrições, como os coeficientes de peso e a capacidade dos veículos. Para auxiliar na obtenção de resultados, o método de otimização conhecido como *Particle Swarm Optimization* (PSO) também foi utilizado.

Há, além disso, outros tipos de modelos matemáticos que lidam com drones. O trabalho proposto por Hong *et al.* (2015), por exemplo, apresenta um modelo que busca encontrar locais ideais para estações de recarga dos drones, garantindo, dessa maneira, que a área de alcance dos mesmos seja maior. Isso se torna importante uma vez que a carga da bateria é o principal fator que limita entregas a pontos mais distantes, como visto na Seção 2.1.3. Hong *et al.* (2015) também levam em conta os obstáculos enfrentados pelo drones, como grandes montanhas ou prédios. O estudo foi feito considerando o uso de apenas um drone e procura localizar pontos no mapa de modo que distância voada seja a menor possível.

Entre os modelos de otimização de drones relacionados a saúde, tem-se o de Lennartsson (2015) que utilizou um método baseado em Sistemas de Informações Geográficas (SIG) para encontrar locais onde posicionar depósitos que abriguem drones com desfibriladores, afim de atender a população na cidade de Estocolmo, na Suécia. O trabalho foi motivado pelo fato desses equipamentos serem utilizados, principalmente, em casos emergenciais, de forma que a

rapidez na entrega é muito importante. Scott e Scott (2020) aprofundaram esse estudo estimando quantos drones e desfibriladores deveriam ser armazenados em cada depósito.

Um estudo realizado por Kim *et al.* (2017) propõe dois modelos matemáticos para coleta e entrega, através de drones, de medicamentos e amostras para exames rotineiros em áreas rurais. O primeiro, definido como planejamento estratégico, procura minimizar a quantidade de centros de distribuição necessária para atender toda área definida, buscando então, os melhores locais para os mesmos. Essa busca leva em conta, não só as distâncias, como também a viabilidade de cada ponto. O segundo modelo, nomeado planejamento operacional, usa os centros de distribuição encontrados e funciona como um PRV com coleta e entrega (PRVCE), múltiplos depósitos (PRVMD) e frota heterogênea (PRV FH), procurando minimizar o custo operacional, o que ajuda a diminuir número de drones usados.

Devido à grande capacidade computacional necessária para a obtenção de resultados nesse tipo problema, o algoritmo de processamento usado procurou reduzir o espaço para a busca de respostas e, depois, definiu limites para auxiliar na convergência de soluções. Testes numéricos foram, então, realizados considerando uma área rural no Texas, EUA, e o resultado pode ser observado na Figura 2.4. Nela, os centros de distribuição são expressos pelos pontos maiores, enquanto os pontos menores representam os pacientes. As linhas cheias representam drones do tipo mais potente, enquanto as linhas pontilhadas representam o tipo menos potente. As linhas azuis indicam as rodovias da região.

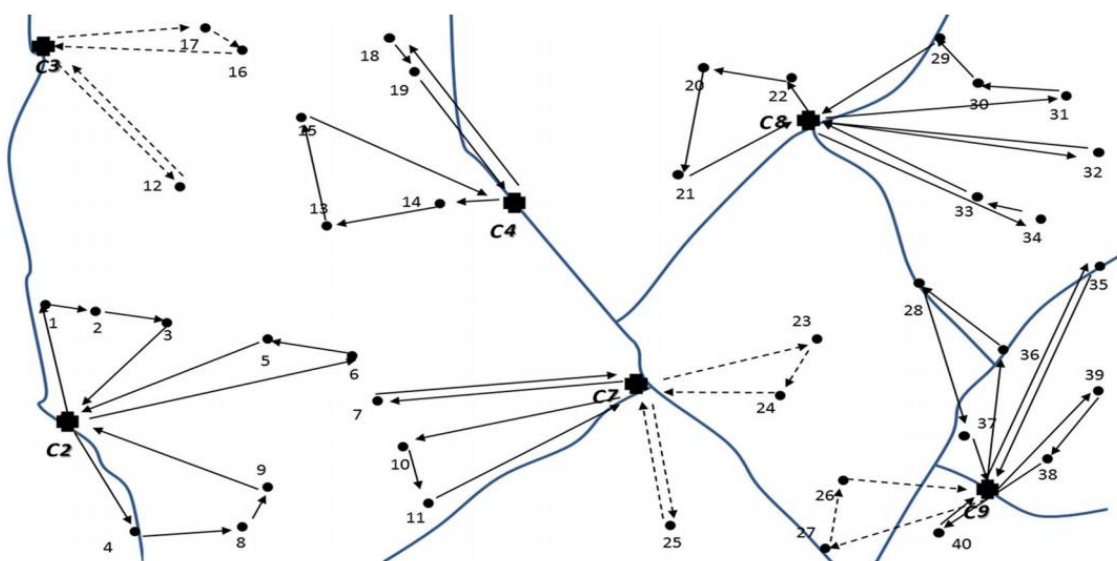


Figura 2.4 – Rotas de drones até pacientes (KIM *et al.*, 2017)

O trabalho feito por Haddad e Pimenta (2019) apresenta dados do Rio de Janeiro que são utilizados neste trabalho, considerando o roteamento de drones para entrega de bolsas de sangue para os hospitais da cidade. Esse roteamento foi feito através do aplicativo TransCAD, de modo que os autores não abordaram, em seu trabalho, o modelo matemático que permitiu a otimização. No estudo, o peso das baterias não foi abordado e considerou-se que cada drone poderia realizar apenas uma rota.

O modelo matemático para o roteamento de drones que é utilizado no presente trabalho, como citado no Capítulo 1, foi elaborado por Dorling *et al.* (2017). Nele, é apresentado o *Drone Delivery Problem* (DDP), problema que possui características do PRVMV e, por levar em conta múltiplas viagens, permite uma redução na frota necessária para a realização das entregas. Além disso, o modelo matemático permite encontrar a capacidade ideal da bateria para cada trajeto a ser feito, visto que ao aumentar a capacidade da bateria, apesar de possibilitar maior tempo de voo, também diminui a capacidade de carga disponível para as encomendas. O trabalho também conta com limites máximos de tempo e de custo que podem ser otimizados separadamente. Tal modelo é apresentado, com detalhes, no Capítulo 3.

3 MODELO MATEMÁTICO

Conforme indicado nos Capítulos 1 e 2, este trabalho utiliza, com algumas alterações, o modelo matemático proposto por Dorling *et al.* (2017), definido como *Drone Delivery Problem* (DDP). Portanto, o presente capítulo apresenta esse modelo com seus conjuntos, parâmetros e variáveis de decisão, assim como suas funções objetivo e restrições.

3.1 CONJUNTOS, PARÂMETROS E VARIÁVEIS DE DECISÃO

O DDP define as rotas realizadas por um grupo de drones a partir de um depósito. Os drones devem deixar o depósito carregados para atender as demandas dos hospitais, sendo que cada hospital é atendido uma única vez. Assim, seja N o conjunto de todos os pontos que um drone pode visitar. Considere ainda que o ponto 0 representa o depósito, de forma que $N_0 = N \setminus 0$ representa o conjunto de hospitais. Diferente desses locais, os drones podem retornar múltiplas vezes ao depósito para troca de baterias e carregamento de bolsas, a fim de fazer novas rotas.

Os demais conjuntos e parâmetros do modelo estão listados a seguir:

- D_i , – demanda de cada hospital dada em kg $i \in N_0$;
- d_{ij} – distância em metros entre os pontos $i \in N_0$ e $j \in N_0$;
- \mathfrak{B} – conjunto de tipos de bateria;
- E_j – energia em kJ da bateria tipo $j \in \mathfrak{B}$;
- C_j – custo em unidades monetárias da bateria tipo $j \in \mathfrak{B}$;
- w_j – peso em kg da bateria tipo $j \in \mathfrak{B}$;
- K – valor grande que representa um limite superior para restrições;
- v – velocidade constante dos drones em m/s;
- M – número máximo de drones disponíveis;
- τ – tempo fixo em segundos de descendência, entrega e ascendência do drone;
- τ_d – tempo fixo gasto no retorno ao depósito antes de nova vigem;
- ξ – densidade de energia da bateria em kJ/kg;
- α – potência em kW consumida por kg de massa;
- β – potência em kW necessária para manter o drone no ar;
- Q – capacidade máxima de carga do drone;
- Q_b – peso máximo de baterias em kg;

- Q_c – peso em kg do contêiner de bolsas de sangue carregado pelo drone;
- F – custo de cada drone;
- ϵ – custo em unidades monetárias de 1 kJ de energia;
- B – limite máximo de gastos para realização das rotas;
- G – valor grande que serve de multiplicador na Função Objetivo; e
- H – valor grande que serve de multiplicador na Função Objetivo.

As variáveis de decisão utilizadas são:

- $x_{ij} \in \{0,1\} \forall (i,j) \in N$. Se o drone deixa o ponto i em direção ao ponto j , então $x_{ij} = 1$, caso contrário, $x_{ij} = 0$;
- $\sigma_{ij} \in \{0,1\} \forall (i,j) \in N_0$. Se o drone chega no depósito vindo do ponto i , ganha nova bateria, novo carregamento, e segue em direção ao ponto j , então $\sigma_{ij} = 1$, caso contrário, $\sigma_{ij} = 0$;
- $t_i \geq 0 \forall i \in N_0$ – tempo em segundos em que o drone realiza a entrega no local i ;
- $a_i \geq 0 \forall i \in N_0$ – tempo em segundos em que o drone retorna ao depósito após sair do local i ;
- $y_{ij} \geq 0 \forall (i,j) \in N$ – carga de bolsas de sangue em kg carregada pelo drone entre os pontos i e j ;
- $q_{ij} \geq 0 \forall (i,j) \in N$ – peso de bateria em kg entre os pontos i e j ;
- $\zeta_i \geq 0 \forall i \in N_0$ – peso de bateria em kg no ponto i ;
- $f_i \geq 0 \forall i \in N$ – energia em kJ consumida pela bateria do drone ao chegar no local i ;
- $z_i \geq 0 \forall i \in N_0$ – energia em kJ consumida pela bateria do drone ao chegar no depósito vindo do local i ;
- $b_{ij} \in \{0,1\} \forall i \in N_0, j \in \mathfrak{B}$. Se a bateria do tipo j está no drone na localização i com energia consumida $z_i > 0$, então $b_{ij} = 1$, caso contrário, $b_{ij} = 0$;
- $l \geq 0$ – tempo em segundos em que a última entrega é realizada; e
- $c \geq 0$ – custo total em unidade monetárias.

Os parâmetros τ_d , Q_b e Q_c não estão presentes no modelo original de Dorling *et al.* (2017) e foram adicionadas exclusivamente neste trabalho. O tempo fixo τ_d foi criado para

representar o tempo gasto a mais no retorno ao depósito, com recarregamento e troca de baterias, antes do drone partir para um novo destino. O limite de carga Q_b foi imposto para garantir que o peso das baterias não ultrapasse um máximo estabelecido, simulando o que ocorre em drones reais. A carga Q_c , por sua vez, foi adicionada para representar o peso fixa do container de bolsas de sangue, que estará sendo carregado em todos os momentos. Dessa forma, o *payload* total, carga útil que pode ser transportada pelo drone, é definido nesse trabalho pela soma da carga do contêiner com a carga das bolsas de sangue, o *payload* útil.

Embora Dorling *et al.* (2017) propõem duas alternativas para o cálculo das baterias, uma que consiste em encontrar uma bateria hipotética de tamanho e energia específicos para a rota a ser realizada, optou-se neste trabalho por abordar a segunda alternativa que considera um conjunto de baterias \mathfrak{B} , em que cada bateria $j \in \mathfrak{B}$ tem uma energia E_j em kJ, um custo C_j em unidades monetárias, um peso w_j em kg, e uma variável de decisão binária b_{ij} , tal que se $b_{ij} = 1$, a bateria de tipo j está no drone na localização i com energia consumida $z_i > 0$, caso contrário, $b_{ij} = 0$. As formulas que representam a primeira alternativa são seguidas da letra b, enquanto as que representam a segunda, são seguidas da letra a.

3.2 FUNÇÕES OBJETIVO E RESTRIÇÕES

Com pequenas alterações no modelo proposto por Dorling *et al.* (2017), apresenta-se a seguir o modelo matemático utilizado neste trabalho.

$$\text{Minimizar } l \tag{3.1}$$

$$\text{Minimizar } c \tag{3.2}$$

Sujeito a:

Restrições de validade de rota:

$$\sum_{\substack{j \in N \\ i \neq j}} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in N_0 \tag{3.3}$$

$$\sum_{\substack{j \in N \\ i \neq j}} x_{ij} - \sum_{\substack{j \in N \\ i \neq j}} x_{ji} = 0 \quad \forall i \in N \tag{3.4}$$

Restrições de Reutilização de drones:

$$\sum_{j \in N_0} \sigma_{ij} \leq x_{i0} \quad \forall i \in N_0 \tag{3.5}$$

$$\sum_{j \in N_0} \sigma_{ji} \leq x_{0j} \quad \forall i \in N_0 \tag{3.6}$$

$$\sum_{i \in N_0} x_{0i} - \sum_{\substack{(i,j) \in N_0 \times N_0 \\ i \neq j}} \sigma_{ji} \leq M \quad (3.7)$$

Restrições de demanda:

$$\sum_{\substack{j \in N \\ i \neq j}} y_{ji} - \sum_{\substack{j \in N \\ i \neq j}} y_{ij} = D_i \quad \forall i \in N_0 \quad (3.8)$$

$$y_{ij} \leq Kx_{ij} \quad \forall (i,j) \in N \times N, i \neq j \quad (3.9)$$

Restrições de tempo:

$$t_i - t_j + \tau + d_{ij}/v \leq K(1 - x_{ij}) \quad \forall (i,j) \in N \times N_0, i \neq j \quad (3.10)$$

$$t_i - a_i + \tau + d_{i0}/v \leq K(1 - x_{i0}) \quad \forall i \in N_0 \quad (3.11)$$

$$a_i - t_j + \tau + \tau_d + d_{0j}/v \leq K(1 - \sigma_{ij}) \quad \forall (i,j) \in N_0 \times N_0, i \neq j \quad (3.12)$$

$$t_i \leq l \quad \forall i \in N_0 \quad (3.13)$$

$$l \leq T \quad (3.14)$$

Restrições de capacidade de carga:

$$q_{ij} + y_{ij} \leq Qx_{ij} \quad \forall (i,j) \in N \times N, i \neq j \quad (3.15)$$

$$\sum_{j \in \mathfrak{B}} w_j b_{ij} - \zeta_i \leq K(1 - x_{i0}) \quad \forall i \in N_0 \quad (3.16a)$$

$$z_i/\xi - \zeta_i \leq K(1 - x_{i0}) \quad \forall i \in N_0 \quad (3.16b)$$

$$\zeta_i - \zeta_j \leq K(1 - x_{ji}) \quad \forall (i,j) \in N_0 \times N_0, i \neq j \quad (3.17)$$

$$q_{ij} \geq \zeta_i - K(1 - x_{ij}) \quad \forall (i,j) \in N \times N_0, i \neq j \quad (3.18)$$

$$q_{i0} \geq \zeta_i - K(1 - x_{i0}) \quad \forall i \in N_0 \quad (3.19)$$

$$\zeta_i \leq Q_b \quad \forall i \in N_0 \quad (3.20)$$

Restrições de energia:

$$f_i - f_j + (\alpha(q_{ij} + y_{ij} + Q_c) + \beta)(d_{ij}/v + \tau) \leq K(1 - x_{ij}) \quad (3.21)$$

$$\forall (i,j) \in N \times N_0, i \neq j$$

$$f_i - z_i + (\alpha(q_{i0} + y_{i0} + Q_c) + \beta)(d_{i0}/v + \tau) \leq K(1 - x_{i0}) \quad (3.22)$$

$$\forall i \in N_0$$

$$z_i \leq Kx_{i0} \quad \forall i \in N_0 \quad (3.23)$$

$$\sum_{j \in \mathfrak{B}} E_j b_{ji} \geq z_i \quad \forall i \in N_0 \quad (3.24)$$

$$b_{ji} \leq z_i \quad \forall i \in N_0, j \in \mathfrak{B} \quad (3.25)$$

Restrições de custo:

$$c = F \sum_{i \in N_0} x_{0i} - F \sum_{\substack{(i,j) \in N_0 \times N_0 \\ i \neq j}} \sigma_{ji} + \sum_{i \in N_0} \sum_{j \in \mathfrak{B}} C_j b_{ji} \quad (3.26a)$$

$$c = F \sum_{i \in N_0} x_{0i} - F \sum_{\substack{(i,j) \in N_0 \times N_0 \\ i \neq j}} \sigma_{ji} + \epsilon \sum_{i \in N_0} z_i \quad (3.26b)$$

$$c \leq B \quad (3.27)$$

Restrições de variáveis de decisão:

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall (i,j) \in N \quad (3.28)$$

$$\sigma_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall (i,j) \in N_0 \quad (3.29)$$

$$t_i \geq 0 \quad \forall i \in N_0 \quad (3.30)$$

$$a_i \geq 0 \quad \forall i \in N_0 \quad (3.31)$$

$$y_{ij} \geq 0 \quad \forall (i,j) \in N \quad (3.31)$$

$$q_{ij} \geq 0 \quad \forall (i,j) \in N \quad (3.32)$$

$$\zeta_i \geq 0 \quad \forall i \in N_0 \quad (3.33)$$

$$f_i \geq 0 \quad \forall i \in N \quad (3.34)$$

$$z_i \geq 0 \quad \forall i \in N_0 \quad (3.35)$$

$$b_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in N_0, j \in \mathfrak{B} \quad (3.36)$$

$$l \geq 0 \quad (3.37)$$

$$c \geq 0 \quad (3.38)$$

O modelo de Dorling *et al.* (2017) traz duas possibilidades de Função Objetivo, de modo que tanto o tempo máximo de entregas como os custos possam ser priorizados. A Função Objetivo (3.1) consiste em minimizar l , ou seja, minimizar o tempo total de entregas. Já a Função Objetivo (3.2) minimiza c , fazendo com que o custo em unidades monetárias seja o menor possível.

No presente trabalho, essas duas funções objetivos foram modificadas, afim de garantir melhores resultados nos testes computacionais conforme Funções Objetivos (3.39) e (3.40). A Função Objetiva (3.1) minimiza l e, com isso, a_{ij} não são precisamente definidos. Assim, optou-se por trabalhar com a Função Objetivo (3.39) que dá maior peso a l , através do parâmetro G , mas também minimiza a_{ij} garantindo assim valores corretos para essas variáveis. Por sua vez, a Função Objetivo (3.2) busca minimizar c sem se importar com os valores de l e a_{ij} . Assim, a Função Objetivo (3.40) dá mais peso a c , através do parâmetro H , mas também garante valores corretos para l e a_{ij} .

$$\text{Minimizar } G \times l + \sum_{i \in N_0} a_i \quad (3.39)$$

$$\text{Minimizar } H \times c + \sum_{i \in N_0} a_i + l \quad (3.40)$$

Com relação às as restrições, as Restrições (3.3) garantem que todos os locais sejam visitados apenas uma vez, com exceção do depósito. Já as Restrições (3.4) são de conservação de fluxo, ou seja, se um drone visita um ponto de demanda, ele deve deixá-lo em direção a um novo ponto de demanda ou ao depósito.

As Restrições (3.5) a (3.7) determinam se um drone pode ou não ser reutilizado após retornar ao depósito. As Restrições (3.5) indicam que se um drone retornar ao depósito saindo do ponto i , ele está livre para voar em direção a outro destino. As Restrições (3.6) garantem que, caso um drone reutilizado deixe o depósito em direção ao local i , ele deve ter chegado anteriormente de um local diferente. O número de drones que podem ser comprados e, portanto, voar simultaneamente, é limitado por M , conforme Restrição (3.7).

A demanda é garantida pelas Restrições (3.8) e (3.9). Elas são aplicadas para certificar que cada hospital receba o que precisa. As Restrições (3.8) garantem que o *payload* útil, ao sair do local i , seja D_i a menos do que era no momento de chegada. Já as Restrições (3.9) fazem com que o *payload* útil em cada vértice sem veículo seja igual a zero.

O cálculo correto dos instantes de tempo é dado pelas Restrições (3.10) a (3.14). Enquanto as Restrições (3.10) registram o tempo t_i em que cada local i é visitado pelo drone, as Restrições (3.11) definem os instantes de tempo a_i em que cada drone chega ao depósito vindo do ponto i . Nota-se que se $x_{i0} = 0$, então $a_i = 0$, caso contrário, $a_i > 0$. As Restrições (3.12) asseguram que os tempos se mantêm corretos para os drones que são reutilizados após o retorno ao depósito. O tempo total de entrega l é obtido através das Restrições (3.13) e limite máximo de tempo T é garantido por Restrição (3.14).

A capacidade de carga é garantida por meio das Restrições (3.15) a (3.20). Nas Restrições (3.15), a capacidade de carga do veículo entre os locais i e j é restringida por Q em kg. As Restrições (3.16a) são usadas no modelo que considera um conjunto \mathfrak{B} de baterias, e encontra ζ_i para locais visitados logo antes do depósito. Já as Restrições (3.16b) fazem o mesmo para o modelo que busca uma bateria hipotética de energia exata para a rota. As Restrições (3.17) garantem que $\zeta_i = \zeta_j$ caso o drone vá diretamente de i para j . O peso q_{ij} das baterias entre os pontos i e j é encontrada através das Restrições (3.18) e (3.19). A primeira diz que $q_{ij} \geq \zeta_i$ se o drone está voando entre i e j , enquanto a segunda garante que $q_{i0} = \zeta_i$ caso o drone viaje diretamente para o depósito após deixar i . Neste trabalho, também foram adicionadas as Restrições (3.20), afim de limitar, com Q_b , o peso de bateria que pode ser carregada por um drone.

A otimização no uso de baterias é muito importante no DDP. Para entender como se dá o consumo das baterias, Dorling *et al.* (2017) demonstram que a potência para um helicóptero n -rotor (veja Equação (3.42)), com densidade de fluido ρ em kg/m^3 , área de disco de rotor ς em m^2 , peso próprio W em kg , e m em kg , soma do *payload* total com o peso das baterias (neste trabalho, definido pela Equação (3.41)), possui uma aproximação linear dada pela Equação (3.43). Nela, α é potência em kW consumida por kg de massa m , enquanto β representa a potência em kW necessária para manter o drone no ar.

$$m_{ij} = q_{ij} + y_{ij} + Q_c \quad (3.41)$$

$$P = (W + m)^{3/2} \sqrt{\frac{g^3}{2\rho\varsigma n}} \quad (3.42)$$

$$p(m_{ij}) = \alpha m_{ij} + \beta \quad (3.43)$$

Com isso em vista, as Restrições (3.21) a (3.25) garantem a parte energética dos drones. Nota-se que o terceiro termo das Restrições (3.21) e (3.22) nada mais é do que a potência $p(m_{ij})$, vista na Equação (3.30). Nas Restrições (3.21), f_i é forçado a igualar ao total de energia consumida ao longo da rota até o local i . Já nas Restrições (3.22), z_i se torna igual a energia consumida pelo voo da rota inteira, de modo que o ponto i é o último visitado antes do retorno ao depósito. Para garantir $z_i = 0$ caso o drone não vá de i para o depósito, e $z_i > 0$ caso contrário, as Restrições (3.23) são então utilizadas.

No caso de uso do modelo que considera um conjunto \mathfrak{B} de baterias, as Restrições (3.24) e (3.25) são adicionadas. A primeira para garantir que a energia das baterias escolhidas seja adequada, e a segunda, para assegurar que $b_{ji} = 0$ em caso de $z_i = 0$. Esta última restrição é exclusiva do presente trabalho.

O custo monetário das entregas é calculado pelas Restrições (3.26a) usadas no modelo que possui um conjunto \mathfrak{B} de tipos de baterias, e pelas Restrições (3.26b) usadas no modelo que encontra baterias com cargas exatas para a rota. O primeiro termo de ambas representa o gasto considerando que toda nova rota precisa de um novo drone, enquanto o segundo termo representa as economias feitas devido a reutilização desses equipamentos. Já o terceiro termo, nas Restrições (3.26a), representa o gasto com as baterias $j \in \mathfrak{B}$ de preço C_j . Nas Restrições

(3.26b), ele indica o custo da energia. A Restrição (3.27) limita o custo máximo pelo orçamento B e as Restrições (3.28) definem o domínio das variáveis de decisão.

Vale destacar que o modelo presume que a demanda de cada cliente possa ser satisfeita por um único drone. Caso isso não seja viável, pode-se criar um novo cliente imaginário no mesmo local.

Com esses aspectos em vista, o Capítulo 4 apresenta aplicações desse modelo em um estudo de caso, envolvendo diversos cenários.

4 ESTUDO DE CASO

Para aplicação do modelo matemático, este trabalho utiliza os dados apresentados por Haddad e Pimenta (2019), como descrito nos Capítulos 1 e 2. Trata-se da entrega de bolsas de sangue através de drones para 63 hospitais no município do Rio de Janeiro, a partir do Hemorio. O mapa com todos esses pontos pode ser visto na Figura 4.1. A lista de hospitais com suas localizações e demandas (apresentadas no Anexo A), assim os drones a serem utilizados, foram extraídos diretamente do trabalho de Haddad e Pimenta (2019). Nele, como destacado no Capítulo 2, o roteamento foi feito através do aplicativo TransCAD, sem que o modelo matemático fosse analisado. Além disso, fatores como a gasto energético das baterias, bem como o peso das mesmas e a possibilidade de reutilização dos drones não foram levados em consideração. Por esses motivos, torna-se impossível comparar os resultados obtidos no presente trabalho com aqueles obtidos por Haddad e Pimenta (2019).

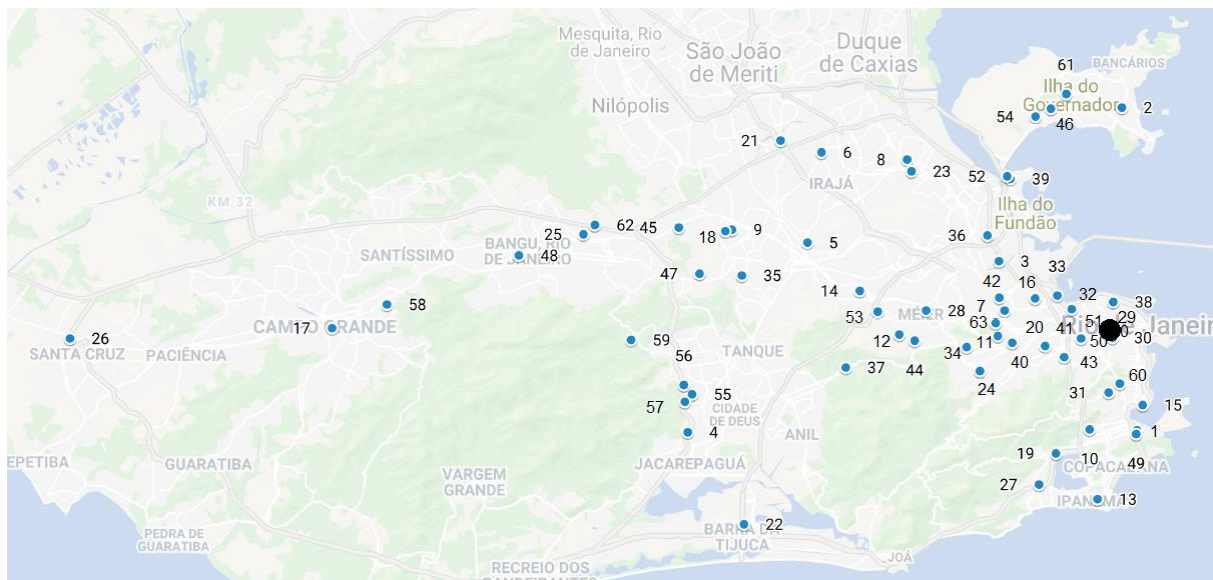


Figura 4.1 – Mapa com o Hemorio (ponto preto) e todos os hospitais (pontos azuis). Feito através do Google Maps.

Como já citado, todos os testes computacionais foram realizados através do programa FICO Xpress, utilizando-se a linguagem computacional Mosel. Utilizou-se um computador equipamento com processador i7 4790 4ghz, 16 GB de memória RAM DDR3, Sistema Operacional Windows 10 do Laboratório de Otimização da COPPE.

4.1 DADOS DE ENTRADA

Conforme descrito no Capítulo 3, o modelo matemático de roteamento de drones possui diversos parâmetros e conjuntos. Assim, a Tabela 4.1 apresenta os valores utilizados para cada um deles, inclusive, com suas unidades.

Tabela 4.1 – Parâmetros e conjuntos usados no modelo matemático

Parâmetro	Valor	Unidade
v	25	m/s
M	2	Unid
F	10000	\$
α	0,0638	kW/kg
β	0,0188	kW
ξ	650	kJ/kg
\mathfrak{B}	{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9}	Tipos
E_j	{2600, 3250, 3900, 4550, 5200, 5850, 6500, 7150, 7800}	kJ
C_j	{2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500, 5000, 5500, 6000}	R\$
w_j	{4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12}	kg
Q_c	1	kg
Q	18	kg
Q_b	12	kg
τ	300	s
τ_d	1500	s
T	43200	s
B	100000	R\$
K	10000000	
G	100000	
H	10000000	

Em relação aos drones, Haddad e Pimenta (2019) utilizaram três tipos em seus testes, conforme mostrado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Tipos de drones (Adaptado de HADDAD e PIMENTA, 2019)

Tipo	Velocidade (km/h)	Soma de <i>payload</i> e peso das baterias (kg)	Tipo de motor
HELIPSE HE-220E	90	16	Elétrico
HELIPSE HE-190ES	90	19	Elétrico
AiDrones AiD-H14	120	6	Combustão

No presente trabalho, o modelo de drone utilizado foi o HELIPSE HE-190ES (Figura 4.2), por possuir a maior capacidade de carga e funcionar a base de bateria, fator importante para o modelo matemático. Sua velocidade, mostrada na Tabela 4.3, foi considerada constante. Isso significa, porém, que o hospital 26, Hospital Municipal Pedro II, não participará do estudo de caso, visto que o mesmo se encontra a uma distância do depósito Hemorio aquém da capacidade do drone (HADDAD e PIMENTA, 2019). A empresa Helipse (2020) considera que a autonomia do drone é de 60 minutos, mas esse valor não foi considerado no trabalho, uma vez que o modelo matemático lida diretamente com o gasto energético. Além disso, em caso de variações do peso carregado, não há informações disponibilizadas pela fabricante que conectem esses dados.

**Figura 4.2 – Drone HE190-ES (HELIPSE, 2020)**

Nos testes realizados, foi considerada a utilização de $M = 2$ drones simultaneamente. O valor do drone (parâmetro F do modelo matemático) não foi disponibilizado pelo fabricante, portanto, para fins de análises, considera-se o valor de R\$ 10.000,00 após avaliação de drones similares.

Tabela 4.3 – Dados de HE-190ES

HELIPSE HE-190ES						
Velocidade	Peso Próprio	Nº de rotores	Diâmetro de Rotor	ζ	m	Peso de Baterias
25 m/s	6 kg	1	2,22 m	3,87 m ²	19 kg	4 kg a 12 kg

Para o cálculo da energia gasta com a bateria dos drones, empregou-se a metodologia proposta por Dorling *et al.* (2017), adequando os dados para o veículo em questão. No trabalho de Dorling *et al.* (2017), utilizou-se um equipamento de 6 rotores, com área de disco de $\zeta = 0,2$ m², peso próprio $W = 1,5$ kg, densidade do ar $\rho = 1.204$ em kg/m³, gravidade $g = 9,81$ m/s², e m , soma do *payload* total com o peso da bateria, variando entre 0 e 3 kg. De acordo com o site da fabricante Helipse (2020), o HE-190ES, como mostra a Tabela 4.3, possui apenas um rotor principal de diâmetro 2,22 m e, portanto, $\zeta = 3,87$ m². Possui, também, peso próprio $W = 6$ kg e m que varia entre 4 e 19 kg. Ao aplicar esses valores na Equação (3.42), mantendo ρ e g , e realizar uma aproximação linear, conforme Dorling *et al.* (2017), encontra-se $\alpha = 0,0638$ kW/kg e $\beta = 0,0188$ kW. Vale destacar que essa aproximação não foi testada empiricamente, e, devido a diferença de proporções entre os drones, é possível que esta equação não seja precisa em relação ao gasto de potência.

Não foi possível encontrar informações detalhadas sobre as baterias utilizadas no HE-190ES. A empresa fabricante somente divulgou que cada uma possui peso de 1 kg, e que, para um funcionamento adequado, é necessário a utilização de um mínimo de 4 e um máximo de 12. Desta forma, este trabalho considera que cada uma delas possui densidade energética $\xi = 650$ kJ/kg, como proposto por Dorling *et al.* (2017). O custo de cada uma foi arbitrado como de R\$ 500,00. Assim, o conjunto \mathfrak{B} de tipos de bateria dado na Tabela 4.1 é tal que 1 representa 4 baterias, 2 representa 5, e assim por diante. O conjunto de energias E_j , custos C_j e pesos w_j associadas a \mathfrak{B} também se encontram na Tabela 4.1.

Como mostra a Tabela 4.3, o m máximo que o HE190-ES pode carregar é 19 kg. A Equação (3.41) mostra que, neste trabalho, m é uma soma não só do peso das baterias q_{ij} com o peso de bolsas de sangue y_{ij} , mas também com a carga fixa Q_c , do contêiner que levará essas bolsas. Do trabalho de Haddad e Pimenta (2019), tem-se que $Q_c = 1$ kg. Assim, o Q , capacidade máxima de carga do drone, será $Q = 19 - Q_c$, ou seja, $Q = 18$ kg. Também da Tabela 4.3, tem-se que a bateria não deve ultrapassar 12 kg, portanto $Q_b = 12$.

O trabalho considera o tempo fixo de descendência, descarregamento, e ascensão do drone igual a 300 segundos, ou 5 minutos, enquanto o tempo de recarregamento e troca de

baterias no depósito, antes de uma nova viagem, é dado por 900 segundos, ou 15 minutos, tal como feito por Haddad e Pimenta (2019). O tempo máximo para a realização de todas as entregas é dado por 43.200 segundos, o que equivale a 12 horas. Esse valor foi utilizado pressupondo-se que alguns hospitais apenas poderiam receber as bolsas sangue durante meio período do dia.

O limite máximo gasto B foi considerado como sendo de R\$ 100.000,00. As constantes de valor grande utilizadas no modelo matemático são dadas por $K = 10^7$, $G = 10^5$, e $H = 10^7$, visto que tais valores apresentaram melhores valores para as variáveis de decisão.

4.2 CENÁRIOS

A princípio, este trabalho tinha como objetivo encontrar rotas ótimas para a entrega de bolsas de sangue através de drones para todos os 62 hospitais, visto que o nº 26 foi desconsiderado. Utilizando todos esses pontos, aplicou-se o modelo matemático com a Função Objetivo (3.39) que minimiza o tempo total de entrega. O modelo empregado, como dito no Capítulo 3, usa a alternativa que considera um conjunto \mathfrak{B} de tipos de bateria, de modo que as Restrições (3.16b) e (3.26b) não foram consideradas. O Xpress, porém, não encontrou nenhuma solução para o problema, mesmo após mais de 48 h de processamento. Isso mostra a dificuldade embutida nesse modelo matemático, assim, por apresentar características do PRV, pode ser classificado como NP-Hard.

Sendo assim, o modelo foi testado em diferentes cenários, de C1 a C14, envolvendo um número menor de pontos. Para todos esses cenários, foi estabelecido um tempo computacional máximo de 7.200 segundos, ou 2 horas. Após esse período, o Xpress fornece a melhor solução encontrada até então.

Os primeiros 4 testes foram feitos levando em conta as quatro zonas da cidade do Rio de Janeiro, sendo elas Central (C1), Sul (C2), Oeste (C3) e Norte (C4). O objetivo dessa divisão por regiões foi garantir que os hospitais, em cada um desses cenários, estivessem próximos entre si, facilitando a obtenção de boas rotas.

Os próximos cinco cenários (C5 a C9) consistem em utilizar 10 pontos hospitalares do conjunto de 62. Eles foram obtidos através do site Ramdon.org e, dessa vez, não houve garantia de proximidade entre os hospitais. Os testes C10 a C14 foram, novamente, feitos com pontos aleatórios, mas dessa vez com 30 hospitais, exigindo maior esforço computacional.

Os resultados obtidos por esses cenários são listados na Tabela 4.4. Nela, observa-se o cenário testado e sua descrição, a melhor solução encontrada, o melhor limitante superior

encontrado (*Best Bound*), a diferença percentual entre eles (GAP), o tempo necessário para a obtenção do resultado, e o número de soluções encontradas.

Tabela 4.4 – Resultados dos testes

Cenário	Descrição	Melhor Solução	<i>Best Bound</i>	GAP (%)	Time (s)	Nº de soluções
C1	12 Pontos (Zona Central)	294.647.992,40	68.322.073,29	76,81%	7217,04	18
C2	9 Pontos (Zona Sul)	176.404.564,40	176.404.489,90	0,00%	1272,27	16
C3	15 Pontos (Zona Oeste)	673.659.994,00	106.562.812,50	84,18%	7209,15	11
C4	26 Pontos (Zona Norte)	1.098.560.200,00	73.522.564,97	93,31%	7230,56	1
C5	10 Pontos Aleatórios 1	389.451.364,40	177.162.974,70	54,51%	7202,05	12
C6	10 Pontos Aleatórios 2	284.047.318,80	147.960.000,00	47,91%	7205,26	8
C7	10 Pontos Aleatórios 3	292.927.564,40	134.522.770,50	54,08%	7205,76	9
C8	10 Pontos Aleatórios 4	290.048.455,20	205.647.721,10	29,10%	7201,42	23
C9	10 Pontos Aleatórios 5	264.407.390,00	229.765.819,80	13,10%	7200,33	23
C10	30 Pontos Aleatórios 1	1.733.704.547,00	83.522.314,29	95,18%	7266,74	3
C11	30 Pontos Aleatórios 2	1.438.580.229,00	71.390.501,79	95,04%	7275,18	1
C12	30 Pontos Aleatórios 3	2.158.987.034,00	111.443.070,20	94,84%	7279,92	1
C13	30 Pontos Aleatórios 4	1.427.403.495,00	88.722.211,93	93,78%	7246,43	9
C14	30 Pontos Aleatórios 5	1.409.819.664,00	122.041.895,20	91,34%	7234,58	2

Para a obtenção de um resultado ótimo, o GAP encontrado deve ser igual a 0,00%. Observa-se que apenas no Cenário C2, por considerar somente 9 hospitais, o menor número entre os casos analisados, a solução ótima foi obtida. Nota-se que, com o aumento do número de hospitais avaliados, os GAPs também aumentaram. Nos Cenários C5 a C9, que contemplam 10 hospitais aleatórios, os GAPs variaram entre 13,10% (C9) e 54,51% (C5), enquanto nos Cenários C10 a C14, com 30 pontos, esses GAP superaram 90%. Esse aumento é justificado pela maior exigência computacional nesses testes.

Cada cenário apresentado conta com sua própria tabela de resultados, além de um mapa com as rotas feitas pelos drones. A seguir, são examinados os Cenários C1, C2 e C9 para que

resultados possam ser analisados individualmente e o funcionamento do modelo matemático possa ser compreendido com maior profundidade.

4.2.1 Cenário C1

Os resultados referentes a C1 se encontram na Tabela 4.5. Nesse exemplo, o Drone 1 completa apenas uma rota, enquanto o Drone 2 faz uma segunda viagem após retornar ao depósito. O mapa desses trajetos pode ser observado na Figura 4.3, com as linhas pretas representando a rota do Drone 1 e as linhas azuis, as rotas do Drone 2. O ponto 0 indica o depósito, enquanto os pontos numerados indicam os hospitais do Anexo A.

Tabela 4.4 – Resultados de C1

C1	$l = 2946,4$ segundos									
	$c = 27000$ R\$									
Rota	Trajeto		Tempo (s)		Payload (kg)	Tipo de bateria	Peso de Baterias (kg)		Energia (kJ)	
	i	j	t_i	a_i	y_{ij}	b_i	q_{ij}	ζ_i	f_i	z_i
Drone 1										
1	0	51	0,0		10	2	5		0,00	
	51	50	311,2		9,5		5	5	323,52	
	50	30	615,6		8,5		5	5	630,27	
	30	32	935,2		6,5		5	5	931,94	
	32	41	1.333,2		5,5		5	5	1.256,83	
	41	7	1.693,6		3,5		5	5	1.528,03	
	7	16	2.153,6		3		5	5	1.815,48	
	16	43	2.518,0		2		5	5	2.031,57	
43	0	2.946,4	3.351,6	0	5	5	2.258,28	2.421,01		
Drone 2										
2	0	42	0,0		14	1	4		0,00	
	42	33	527,2		4		4	4	648,98	
	33	0	941,6	1.365,2	0		4	4	894,72	1.037,81
3	0	29			9,5	2	5		0,00	
	29	38	2.568,0		5		5	5	305,13	
	38	0	2.921,2	3.275,6	0		5	5	3.107,67	3.250,00



Figura 4.3 – Rotas de C1. Linhas pretas indicam trajeto do Drone 1. Linhas azuis indicam trajeto do Drone 2. Feito através do Google Maps.

Com um GAP de 76,81%, é possível perceber, através dessa figura, que a solução encontrada realmente não foi a melhor possível, visto que o Drone 1 percorreu um caminho visivelmente maior que o necessário, i.e., o cruzamento existente entre os hospitais 7 e 16 poderia ser removido se esse drone realizasse a seguinte rota $0 - \dots - 41 - 16 - 7 - 43 - \dots - 0$.

4.2.2 Cenário C2

O Cenário C2, única solução ótima encontrada, pode ser visto na Tabela 4.5 e na Figura 4.3. Nessa situação, os drones conseguiram realizar todas as entregas sem que fosse necessária uma segunda viagem. Observa-se que, como a Função Objetivo (3.39) minimiza l , equivalente ao maior t_i , a rota que, nesse caso, deveria ser a menor possível, é a Rota 2, realizada pelo Drone 2. Pode-se notar, através da Figura 4.5, que o Drone 1 poderia ter percorrido um caminho menor, mas como isso não influenciaria no t_i máximo do cenário, o modelo matemático não leva isso em consideração no processo de otimização.

Ainda na Tabela 4.5, acerca da energia, percebe-se que o valor exibido na coluna de z_i pode tanto representar o valor exato do gasto energético até então, o que acontece na Rota 2, com também pode exibir o valor do total de energia disponível nas baterias, como na Rota 1. Vale ressaltar que, nessa rota, o valor exato, de acordo com as Restrições (3.22), seria $z_i = 2171,39$. Dessa forma, a bateria Tipo 1, que fornece 2600 kJ (com visto na Tabela 4.1), seria

suficiente para realizar a viagem. Entretanto, como o limite máximo de peso não foi ultrapassado com o uso desse tipo de bateria (veja Restrições 3.15), o modelo matemático não utilizou a bateria mínima necessária para a realização da tarefa.

Tabela 4.5 – Resultados de C2

C2	$l = 1764$ segundos									
	$c = 26000$ R\$									
Rota	Trajeto		Tempo (s)		Payload (kg)	Tipo de bateria	Peso de Baterias (kg)		Energia (kJ)	
	i	j	t_i	a_i	y_{ij}	b_i	q_{ij}	ζ_i	f_i	z_i
Drone 1										
1	0	10	0,0		10	5	8			
	10	13	500,0		8,5		8	8	615,50	
	13	27	937,6		7		8	8	1.112,31	
	27	19	1.355,6		3		8	8	1.546,86	
	19	0	1.724,8	2.289,6	0		8	8	1.836,46	5.200,00
Drone 2										
2	0	60	0,0		4	1	4			
	60	31	406,8		3		4	4	241,23	
	31	15	734,8		1,5		4	4	414,81	
	15	1	1.105,6		1		4	4	575,55	
	1	49	1.455,6		0,5		4	4	716,11	
	49	0	1.764,0	2.274,8	0		4	4	830,13	1.002,68

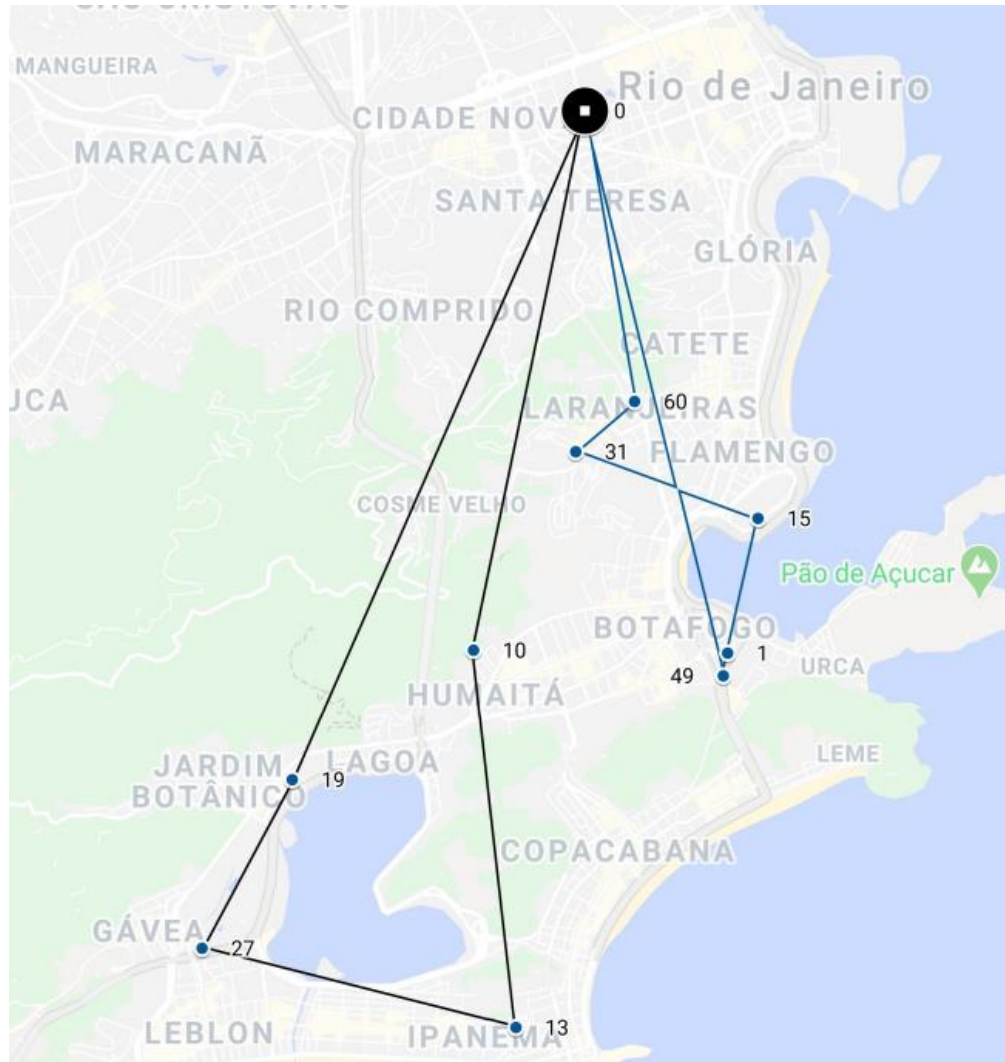


Figura 4.4 – Rotas de C2. Linhas pretas indicam trajeto do Drone 1. Linhas azuis indicam trajeto do Drone 2. Feito através do Google Maps.

4.2.3 Cenário C9

Com GAP de 13,10%, o menor diferente de zero obtido, os resultados do Cenário C9 se encontram na Tabela 4.6 e na Figura 4.4. Mesmo com esse GAP pequeno, ainda é perceptível que a rota encontrada não foi a melhor possível. Na Rota 1, que é a minimizada por possuir o maior t_i , o Drone 1 poderia ter ido ao ponto 6 após visitar o ponto 49, e então seguir para o ponto 39 antes de retornar ao depósito. Dessa maneira, teria percorrido um caminho mais curto e levaria, conseqüentemente, menos tempo.

Vale observar que o modelo matemático minimiza o tempo máximo de entrega t_i , e não o tempo de retorno ao depósito a_i , que marca a finalização da rota. Dessa maneira, apesar do

Drone 1 levar mais tempo para concluir suas entregas, as rotas de C9 só são finalizadas quando o Drone 2 retorna ao depósito, pois esse demora mais tempo com último trecho.

Tabela 4.6 – Resultados de C9

Rota	Trajeto		Tempo (s)		Payload (kg)	Tipo de bateria	Peso de Baterias (kg)		Energia (kJ)	
	i	j	t_i	a_i	y_{ij}	b_i	q_{ij}	ζ_i	f_i	z_i
C9	$l = 2.644,0 \text{ s}$									
	$c = 24.000 \text{ R\$}$									
Drone 1										
1	0	30	0,0		7,5	1	4		0,00	
	30	60	316,8		5,5		4	4	258,60	
	60	49	707,2		4,5		4	4	527,47	
	49	39	1.111,6		4		4	4	1.515,88	
	39	6	1.968,8		0,5		4	4	2.024,20	
	6	0	2.644,0	3.609,6	0		4	4	2.273,82	2.600,00
Drone 2										
2	0	41	0,0		4	1	4		0,00	
	41	12	360,8		2		4	4	213,95	
	12	5	1.018,0		1,5		4	4	519,82	
	5	57	1.573,2		1		4	4	760,49	
	57	4	2.267,2		0,5		4	4	1.039,20	
	4	0	2.626,4	3.780,4	0		4	4	1.172,00	2.600,00

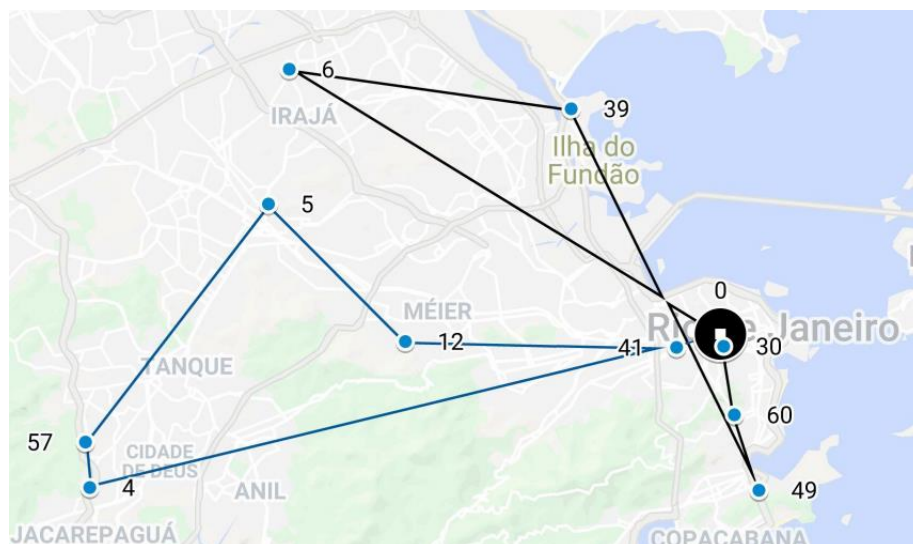


Figura 4.5 – Rotas de C9. Linhas pretas indicam trajeto do Drone 1. Linhas azuis indicam trajeto do Drone 2. Feito através do Google Maps.

Os resultados obtidos demonstram a dificuldade de se conseguir soluções ótimas para problemas desse tipo, de classificação NP-Hard. A solução ótima só foi obtida no cenário com nove vértices, enquanto, nos outros casos, os mapas tornaram visível que as rotas escolhidas não foram as melhores.

Além disso, os resultados também revelaram características do modelo matemático que poderiam ser aperfeiçoadas afim de evitar gastos desnecessários, como o uso de baterias maiores e a utilização rotas mais longas do que o necessário.

Essas mesmas conclusões podem ser feitas a partir dos cenários que não foram analisados individualmente. Suas tabelas estão presentes no Apêndice A.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

Esse trabalho ressaltou a importância da rapidez na entrega de bolsas de sangue, um problema que envolve vidas. Como solução, foi proposto o roteamento de drones para a realização de tais entregas, evitando, dessa maneira, o crescente trânsito da cidade do Rio de Janeiro. Objetivou-se, então, apresentar um modelo matemático de otimização que pudesse definir rotas para a distribuição de bolsas de sangue via drones, tendo o município do Rio de Janeiro como estudo de caso.

Para isso, primeiramente, foi feito um estudo acerca dos principais conceitos envolvidos no problema. Apresentou-se, então, o problema de roteamento de veículos (PRV) com suas características e variações mais importantes. Constatou-se que tal problema é classificado como NP-Hard, o que significa que um grande esforço computacional é necessário para a obtenção de resultados ótimos. Em seguida foi feita uma breve apresentação sobre drones, com destaque para os seus tipos e componentes mais relevantes para este trabalho. Foram mostrados, também, casos reais de empresas que utilizam drones para entregas relacionadas a área da saúde. Percebeu-se, porém, que essas entregas são do tipo ponta-a-ponta, não levando em conta o roteamento das aeronaves.

Com esses elementos já esclarecidos, modelos matemáticos que combinem o PRV e a utilização de drones foram analisados. Diversos tipos de modelos foram explorados, mas destaca-se aquele proposto por Dorling *et al.* (2017), que leva em conta múltiplas viagens e otimiza o uso de baterias. Esse modelo foi, então, apresentado com seus conjuntos, parâmetros e variáveis de decisão. Suas Funções Objetivo e Restrições também foram expostas e detalhadas. Os pontos do modelo mais importantes para este trabalho foram enfatizados, assim como as alterações feitas para que ele se adequasse ao problema proposto.

Após a definição do modelo, foram estabelecidos os valores dos parâmetros de entrada. Destaca-se aqueles participantes do cálculo de gasto energético, que foram obtidos de acordo com o proposto por Dorling *et al.* (2017), adequando-se ao drone utilizado neste trabalho.

Com o modelo matemático e os parâmetros definidos, utilizou-se o *solver* FICO Xpress e a linguagem computacional Mosel em um estudo de caso do Rio de Janeiro, utilizando uma lista de hospitais e suas respectivas demandas, apresentada por Haddad e Pimenta (2019). Devido ao grande número de vértices e a dificuldade embutida nesse tipo de problema, nenhuma solução foi encontrada para o problema envolvendo todos os hospitais da cidade, mesmo após 48 horas de processamento. Foram testados, então, diferentes cenários envolvendo quantidades variadas de hospitais, com um limite de tempo estabelecido de duas horas. Uma

solução ótima só pôde ser encontrada, durante este período, para o cenário com nove hospitais, o menor cenário entre os analisados, provando mais uma vez a dificuldade do problema. Já os cenários com mais vértices, 30, obtiveram soluções distantes das ótimas.

Embora o modelo tenha se mostrado interessante, os tempos computacionais necessários para a obtenção de bons resultados foram altos. Recomenda-se, então que trabalhos futuros utilizem métodos heurísticos na resolução deste problema, pois poderiam encontrar boas soluções aproximadas em um tempo menor.

Sugere-se, também, a análise de novos cenários para que se possa observar diferentes aspectos do modelo. Pode-se considerar diferentes critérios para o agrupamento de hospitais como a distância até o Hemorio e a demanda exigida por cada um. Além disso, testes utilizando diferentes tipos de drones também podem ser feitos.

Além disso, há características do modelo matemático aqui implementado que podem ser aperfeiçoadas em novos trabalhos. O peso das baterias poderia ser minimizado sempre que possível, e não só quando necessário. O mesmo poderia ser feito com as rotas que não influenciam no tempo máximo total de entrega. Também seria interessante que o tempo de retorno ao depósito e, conseqüentemente, finalização da rota, fosse minimizado.

Outro fator visto neste trabalho que poderia ser considerando em um outro estudo é a influência do peso carregado pelo drone no gasto energético das baterias. Afinal, o trabalho contou com aproximações que não foram testadas empiricamente, de modo que não se sabe se os resultados obtidos estão adequados. O uso de múltiplos depósitos e frota heterogênea de drones também poderia ser abordado em outros trabalhos.

Embora o tempo de autonomia disponibilizado pelo fabricante não tenha sido utilizado no trabalho, recomenda-se que novos testes sejam feitos avaliando o tempo total em uma rota, de acordo com esse dado.

Para deixar o problema mais próximo da realidade, recomenda-se o estudo de um modelo matemático que leve em consideração os obstáculos existentes na cidade, como morros, prédios e área próximas a aeroportos, onde o voo é proibido. Fatores como o clima, que muda constantemente, também precisariam ser analisados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A. OTTO, N. AGATZ, J. CAMPBELL, B. GOLDEN and E. PESCH. Optimization approaches for civil applications of unmanned aerial vehicles (UAVs) or aerial drones: A survey. *Networks*, v. 72 p. 411–458, 2018.

AUSTRALIA. Types of drone. *Civil Aviation Safety Organization*, 2020. Disponível em: <https://www.casa.gov.au/drones/rules/drone-types>. Acesso em: 20 janeiro 2020.

AYADI, R., & BENADADA, Y.. Memetic Algorithm for a Multi-Objective Vehicle Routing Problem with Multiple Trips. *IJCSA*, 10, 72-91, 2013.

BALDACCI, R., BATTARRA, M., Vigo, D. Routing a heterogeneous fleet of vehicles. In B. L. Golden, S. Raghavan, E. A. Wasil, eds. *The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges.. Springer*, New York, 2008.

BALDACCI, R., TOTH, P., & Vigo, D. Exact algorithms for routing problems under vehicle capacity constraints. *Annals of Operations Research*, 175(1), p. 213–245, 2010.

BRÄYSY, O., & GENDREAU, M.. Vehicle Routing Problem with Time Windows, Part I: Route Construction and Local Search Algorithms. *Transportation Science*, v. 39(1), p. 104–118, 2005.

CHEN, J. F.; WU, T. H. Vehicle routing problem with simultaneous deliveries and pickups. *Journal of the Operational Research Society*, v. 57(5), p. 579-587, 2006.

CLARKE, G., & WRIGHT, J. W.. Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations Research*, v. 12(4), p. 568–582, 1964.

COLETAS externas. Hemorio Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <<http://www.hemorio.rj.gov.br/>>. Acesso em: 24 maio 2019.

DANTZIG, G. B., & RAMSER, J. H.. The truck dispatching problem. *Management Science*, v. 6(1), p. 80–92, 1959.

DEMOLINARI, Humberto Cascardo. Projeto de Construção de um Drone Hexacóptero. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal Fluminense, Niterói-RJ.

DHL. *Successful trial integration of DHL parcelcopter into logistics chain*. 2016. Disponível em: http://www.dhl.com/en/press/releases/releases_2016/all/parcel_ecommerce/successful_trial_integration_dhl_parcelcopter_logistics_chain.html 20 Acesso em: 15 fevereiro 2020.

DOAÇÃO de sangue: requisitos, como doar, quem pode doar, impedimentos. Portal do Ministério da Saúde, 2019. Disponível em: <<http://portalms.saude.gov.br/saude-de-a-z/doacao-de-sangue>> . Acesso em: 24 maio 2019.

DPDHL. DHL *Parcelcopter*. Disponível em: <https://www.dpdhl.com/en/media-relations/specials/dhl-parcelcopter.html>. Acesso em: 15 fevereiro 2020.

DORLING, K., HEINRICHS, J., MESSIER, G. G., & Magierowski, S. Vehicle Routing Problems for Drone Delivery. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, v. 47(1), p. 70–85, 2017.

EKSIOGLU, B., VURAL, A. V., & REISMAN, A. (2009). The vehicle routing problem: A taxonomic review. *Computers & Industrial Engineering*, 57(4), p. 1472–1483. 2009.

FICO. Fair Isac Announces Release of Xpress-MP 2008A *Optimization Suite*. 2008. Disponível em: <https://www.fico.com/br/newsroom/fair-isaac-announces-release-of-xpress-mp-2008a-optimization-suite-08-04-2008>. Acesso em: 20 fevereiro 2020.

FLEISCHMANN, B. The vehicle routing problem with multiple use of vehicles. *Technical report, Fachbereich Wirtschaftswissenschaften*, Universität Hamburg, 1990.

FLOREANO, D., WOOD, R.J. “Science, Technology and the Future of Small Autonomous Drones”, *Macmillan Publisher* v. 521, Maio 2015.

FROTA de veículos do Rio de Janeiro. Cidades IBGE, 2019. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rj/rio-de-janeiro/pesquisa/22/28120?indicador=28120&tipo=grafico>>. Acesso em: 23 maio 2019.

FUKASAWA R., LONGO H., LYSGAARD J., POGGI D. M., REIS M., UCHOA E. & WERNECK R. F. Robust branch-and-cut-and-price for the capacitated vehicle routing problem. *Math. Program. Ser. V.* 106: p. 491–511, 2006.

GOLDEN, B. L., ASSAD, A. A., LEVY, L., GHEYSENS, F.. The fleet size and mix vehicle routing problem. *Computers & Operations Research* v. 11, p. 49–66, 1984.

HADDAD, Juliana Martins.; PIMENTA, M. A. D. L. Sistema de Transporte via Drone para a entrega de Bolsas de Sangue em Hospitais do Rio de Janeiro. 2019. Projeto de Graduação (Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ.

HELIPSE. HE190ES. Disponível em: <https://helipse.com/en/product/HE190>. Acesso em: 20 fevereiro 2020.

HONG, L.; KUBY M.; MURRAY, A. A Deviation Flow Refueling Location Model for Continuous Space: A commercial drone delivery System for Urban Areas Advances in Geographic Information Science. In: GRIFFITH D. et al. (org.) *Advances in Geocomputation. Advances in Geographic Information Science*. Springer, Chan, 2017.

ICAO. Circular 328, Unmanned Aircraft Systems (UAS). Montréal, Quebec, Canadá, 2011.

ICHOUA, S., GENDREAU, M., & Potvin, J.-Y. Vehicle dispatching with time-dependent travel times. *European Journal of Operational Research*, v. 144(2), p. 379–396, 2003.

JIANG, X. et al. Method of Task Assignment for UAV Based on Particle Swarm Optimization in logistics. *Proceedings of the 2017 International Conference on Intelligent Systems. Metaheuristics & Swarm Intelligence*, p. 113-117, 2017.

KAPLAN, Deborah. How Medical Drones Help Save Lives in Tanzania. 2019. Disponível em: <<http://www.delivered.dhl.com/en/articles/2019/06/medical-drones-save-lives-Tanzania.html>> Acesso em: 10 fevereiro 2020.

KIM, S. J. et al. Drone-Aided Healthcare Services for Patients with Chronic Diseases in Rural Areas. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, v. 88, p. 163-180, 2017.

KOÇ, Ç., BEKTAŞ, T., JABALI, O., & LAPORTE, G.. Thirty years of heterogeneous vehicle routing. *European Journal of Operational Research*, v. 249(1), p. 1–21, 2016.

LAFEE, Scott. UC San Diego Health Launches Drone Transport Program With UPS, Matternet. *UC San Diego News Center*, San Diego, California, 29 jan. 2020. Disponível em: <https://ucsdnews.ucsd.edu/pressrelease/uc-san-diego-health-launches-drone-transport-program-with-ups-matternet>. Acesso em: 10 fevereiro 2020.

LAPORTE G.. The Vehicle Routing Problem: An overview of exact and approximate algorithms. *European Journal of Operational Research* v. 59: p. 345-358, 1992.

LAU, C. H. SIM, M. e TEO M. K.. Vehicle routing problem with time windows and limited number of vehicles. *European Journal of Operational Research*, v. 148, p. 3,559, -569, 2003.

LENSTRA, J. K., & RINNOOY KAN, A. H. G.. Complexity of vehicle routing and scheduling problems. *Networks*, v. 11(2), p. 221–227, 1981.

LEON, Riley de. Zipline takes flight in Ghana, making it the world's largest drone-delivery network. CNBC, 2019. Disponível em: <https://www.cnbc.com/2019/04/24/with-ghana-expansion-ziplines-medical-drones-now-reach-22m-people.html> Acesso em: 10 fevereiro 2020.

MALANDRAKI, C. and DASKIN, M. Time Dependent Vehicle Routin Problem: Formulations, Solution Algorithms And Computational Experiments. *Transportation Sciencie*, v. 26(3), p. 185- 200, 1992.

MATTERNET, 2019, Disponível em <https://matternet.tumblr.com>, acesso em 23/5/2019, 19:30:00.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. Caderno de informação: sangue e hemoderivados : rede física, produção, gastos públicos com hemoterapia e consumo de hemoderivados. Ministério da Saúde. – Brasília : Editora do Ministério da Saúde, 2018

MINISTÉRIO da saúde reforça campanha para incentivar doação de sangue. Portal do Ministério da Saúde, 2019. Disponível em: <<http://portalms.saude.gov.br/noticias/agencia-saude/44728-saude-reforca-campanha-para-incentivar-doacao-de-sangue>>. Acesso em 23 maio 2019.

MOSTERMAN, P. J. et al. Automating humanitarian missions with a heterogeneous fleet of vehicles. *Annual Reviews in Control*, v. 38 (2), p. 259-270, 2014.

OTURAKÇI, M , UYAN, I .. Optimization Of A Vehicle Routing Problem In A Logistics Company In Turkey. *Alphanumeric Journal*, v. 2 (2), p. 13-24, 2014.

PARTYKA, J., & HALL, R. Vehicle Routing Software Survey: VR delivers the goods. *ORMSToday*, v. 41(1), 2018. Disponível em: <https://www.informs.org/ORMS-Today/PublicArticles/February-Volume-41-Number-1/Vehicle-Routing-Software-Survey-VR-deliversthe-goods> Acesso em: 12 fevereiro 2020.

POPULAÇÃO do Rio de Janeiro. Cidades IBGE, 2019. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rj/rio-de-janeiro/panorama>>.

PWC. Clarity from Above – PwC *Global Report on the Commercial Applications of Drone Technology*, 2016. Disponível em: www.dronepoweredolutions.com Acesso em: 12 fevereiro 2020.

REDE de atendimento. Secretaria de Saúde do Governo do Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <<https://www.saude.rj.gov.br/rede-de-atendimento>>. Acesso em: 23 maio 2019. Acesso em: 15 janeiro 2020.

REDUÇÃO de leitos afeta 22 estados e 18 capitais. Portal do Conselho Federal de Medicina, 2019. Disponível em: <https://portal.cfm.org.br/index.php?option=com_content&view=article&id=27722:2018-07-12-14-14-20&catid=3>. Acesso em 23 maio 2019.

REED, T., KIDD, J., *Global Traffic Scorecard*, INRIX, 2019.

REGO C. A subpath ejection method for the vehicle routing problem. *Management Science*, 44, p.1447-1459, 1998.

RENAUD, J. et al. A Tabu Search heuristic for the Multi Depot Vehicle Routing Problem. *Computers & Operations Research*, v. 23, p. 229-235, 1996.

SCHERMER, D., MOEINI, M., & WENDT, O.. Algorithms for Solving the Vehicle Routing Problem with Drones. *Lecture Notes in Computer Science*, p. 352–361. 2018.

SOLOMON M.M. . Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Window Constraints. *Operations Research* v. 35: p. 254–265, 1987.

SCOTT, J. E; SCOTT, C. H. Drone Delivery Models For Medical Emergencies. In: WICKRAMASINGHE, N.; BODENDORF F. (org). *Delivering Superior Health and Wellness Management with IoT and Analytics*. Springer International Publishing, 2020.

SUBRAMANIAN, A. et al. A parallel heuristic for the Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery. *Computers & Operations Research*, v. 37(11), p. 1899-1911, 2010.

SWISS POST. Drones, a vision has become reality. Disponível em: <https://www.post.ch/en/about-us/innovation/innovations-in-development/drones> Acesso em: 12 fevereiro 2020.

TOTH, P., & VIGO, D. *The Vehicle Routing Problem*. Philadelphia: SIAM, 2002.

WINGCOPTER. Wingcopter, DHL and GIZ pilot drone delivery in Tanzania. Disponível em : <https://wingcopter.com/deliverfuture/> Acesso em: 12 fevereiro 2020.

VIDAL, T. et al. Implicit depot assignments and rotations in vehicle routing heuristics. *European Journal of Operational Research*. V. 237 (1), p. 15-28, 2014.

ZIMMERMAN, L. H. Causes and Consequences of Critical Bleeding and Mechanisms of Blood Coagulation. *Pharmacotherapy: The Journal of Human Pharmacology and Drug Therapy*, v. 27: p. 45S-56S, 2007.

ZIPLINE. How It Works – Safe, fast, Precise & Magical. Disponível em: <https://flyzipline.com/how-it-works/>

APÊNDICE A – RESULTADOS DOS CENÁRIOS

Tabela A – Resultados de C3

C3	l = 6736,4 segundos									
	c = 34500 R\$									
Rota	Trajeto		Tempo (s)		Payload (kg)	Tipo de bateria	Peso de Baterias (kg)		Energia (kJ)	
	<i>i</i>	<i>j</i>	<i>t_i</i>	<i>a_i</i>	<i>y_{ij}</i>	<i>b_i</i>	<i>q_{ij}</i>	<i>ζ_i</i>	<i>f_i</i>	<i>z_i</i>
Drone 1										
1	0	35	0,0		0,5	3	6		0,00	
	35	0	1.031,6	2.063,2	0		6	6	513,02	3.900,00
2	0	22			10,5	4	7		0,00	
	22	56	4.077,6		7,5		7	7	1.336,28	
	56	48	4.675,2		5,5		7	7	1.938,48	
	48	58	5.386,4		4,5		7	7	2.564,41	
	58	17	5.962,8		3		7	7	3.034,92	
	17	0	6.380,4	8.210,0	0		7	7	3.335,84	4.304,07
Drone 2										
3	0	37	0,0		1,5	5	8		0,00	
	37	0	825,2	1.650,4	0		8	8	568,32	5.200,00
4	0	4			9	5	8		0,00	
	4	57	3.704,4		8,5		8	8	1.346,95	
	57	59	4.063,6		8		8	8	1.754,75	
	59	55	4.524,0		7		8	8	2.262,75	
	55	47	4.984,0		6,5		8	8	2.740,97	
	47	45	5.520,4		4,5		8	8	3.281,50	
	45	25	5.920,0		3,5		8	8	3.633,19	
	25	62	6.407,6		0,5		8	8	4.031,22	
62	0	6.736,4	8.070,4	0	8	8	4.236,68	5.027,75		

Tabela B – Resultados de C4

C4	$l = 10985,2$ segundos									
	$c = 35000$ R\$									
Rota	Trajeto		Tempo (s)		Payload (kg)	Tipo de bateria	Peso de Baterias (kg)		Energia (kJ)	
	i	j	t_i	a_i	y_{ij}	b_i	q_{ij}	ζ_i	f_i	z_i
Drone 1										
1	0	9	0,0		8,5	4	7		0,00	
	9	36	1.069,2		8		7	7	1.145,65	
	36	2	1.871,2		3		7	7	1.979,41	
	2	61	2.535,6		2,5		7	7	2.458,17	
	61	8	2.948,4		1,5		7	7	2.742,47	
	8	0	3.586,4	4.406,0	0		7	7	3.141,16	3.574,89
2	0	3			10,5	3	6		0,00	
	3	53	5.862,8		10		6	6	632,14	
	53	34	6.420,4		9		6	6	1.247,39	
	34	24	6.908,0		7,5		6	6	1.754,30	
	24	52	7.261,6		4,5		6	6	2.088,06	
	52	39	7.946,4		3,5		6	6	2.603,37	
	39	0	8.254,8	8.908,8	0		6	6	2.815,77	3.120,14
3	0	44			13	1	4		0,00	
	44	40	10.494,0		5		4	4	799,77	
	40	0	10.985,2	11.480,0	0		4	4	1.122,39	1.289,53
Drone 2										
4	0	23	0,0		10	4	7		0,00	
	23	18	799,2		6,5		7	7	932,83	
	18	5	1.483,2		3,5		7	7	1.578,45	
	5	6	1.946,0		3		7	7	1.926,71	
	6	11	2.424,4		2,5		7	7	2.271,45	
	11	21	3.223,6		2		7	7	2.821,85	
	21	0	4.097,2	5.144,0	0		7	7	3.395,64	3.949,60
5	0	46			10,5	3	6		0,00	
	46	54	6.792,0		8		6	6	849,20	
	54	28	7.126,0		7,5		6	6	1.175,12	
	28	12	7.862,8		3,5		6	6	1.870,59	
	12	14	8.233,2		3		6	6	2.125,68	
	14	20	8.648,8		2		6	6	2.398,65	
	20	63	9.329,2		0,5		6	6	2.802,12	
	63	0	9.736,0	10.261,6	0		6	6	3.004,43	3.249,04

Tabela C – Resultados de C5

C5	$l = 3.894,4$ segundos									
	$c = 28.000$ R\$									
Rota	Trajeto		Tempo (s)		Payload (kg)	Tipo de bateria	Peso de Baterias (kg)		Energia (kJ)	
	i	j	t_i	a_i	y_{ij}	b_i	q_{ij}	ζ_i	f_i	z_i
Drone 1										
1	0	37	0,0		10	5	8		0,00	
	37	28	825,2		8,5		8	8	1.015,82	
	28	45	1.318,0		4,5		8	8	1.575,30	
	45	47	2.130,8		3,5		8	8	2.290,64	
	47	62	2.530,4		1,5		8	8	2.616,84	
	62	48	3.058,0		1		8	8	2.980,19	
	48	0	3.518,8	4.990,4	0		8	8	3.282,85	4.155,51
Drone 2										
2	0	33	0,0		14	1	4		0,00	
	33	42	423,6		10		4	4	521,45	
	42	0	838,0	1.365,2	0			4	925,82	1.103,91
3	0	13			4,5	1	4		0,00	
	13	22	2.898,4		3		4	4	395,69	
	22	0	3.894,4	5.008,8	0		4	4	922,77	1.299,21

Tabela D – Resultados de C6

C6	$l = 2.840,4$ segundos									
	$c = 29500$ R\$									
Rota	Trajeto		Tempo (s)		Payload (kg)	Tipo de bateria	Peso de Baterias (kg)		Energia (kJ)	
	i	j	t_i	a_i	y_{ij}	b_i	q_{ij}	ζ_i	f_i	z_i
Drone 1										
1	0	14	0,0		4,5	9	12		0,00	
	14	9	798,4		3,5		12	12	906,42	
	9	5	1.376,8		3		12	12	1.526,18	
	5	56	1.827,2		2,5		12	12	1.994,41	
	56	57	2.496,8		0,5		12	12	2.669,17	
	57	0	2.830,4	3.978,4	0		12	12	2.962,77	3.936,51
Drone 2										
2	0	61	0,0		10	4	7		0,00	
	61	36	769,2		9		7	7	897,81	
	36	7	1.386,0		4		7	7	1.578,39	
	7	30	1.836,8		3,5		7	7	1.931,99	
	30	10	2.355,6		1,5		7	7	2.322,39	
	10	0	2.840,4	3.340,4	0		7	7	2.625,34	2.889,94

Tabela E – Resultados de C7

C7	$l = 2.929,2$ segundos									
	$c = 25.500$ R\$									
Rota	Trajeto		Tempo (s)		Payload (kg)	Tipo de bateria	Peso de Baterias (kg)		Energia (kJ)	
	i	j	t_i	a_i	y_{ij}	b_i	q_{ij}	ζ_i	f_i	z_i
Drone 1										
1	0	38	0,0		10,5	2	5		0,00	
	38	23	354,4		5,5		5	5	379,74	
	23	12	1.126,8		2		5	5	960,97	
	12	35	1.747,6		1,5		5	5	1.289,50	
	35	59	2.377,6		1		5	5	1.602,80	
	59	0	2.929,2	4.171,2	0		5	5	1.859,51	2.358,30
Drone 2										
2	0	51	0,0		9	3	6		0,00	
	51	27	311,2		8,5		6	6	323,52	
	27	43	939,6		4,5		6	6	956,76	
	43	52	1.494,4		2,5		6	6	1.374,25	
	52	34	2.165,2		1,5		6	6	1.793,43	
	34	0	2.808,8	3.393,2	0		5	6	2.154,56	2.426,54

Tabela F – Resultados de C8

C8	$l = 2.900,4$ segundos									
	$c = 24.500$ R\$									
Rota	Trajeto		Tempo (s)		Payload (kg)	Tipo de bateria	Peso de Baterias (kg)		Energia (kJ)	
	i	j	t_i	a_i	y_{ij}	b_i	q_{ij}	ζ_i	f_i	z_i
Drone 1										
1	0	29	0,0		10,5	2	5		0,00	
	29	27	302,8		6		5	5	324,45	
	27	55	937,6		2		5	5	822,39	
	55	58	1.942,0		1,5		5	5	1.353,92	
	58	0	2.866,8	4.589,2	0		5	5	1.813,82	3.250,00
Drone 2										
2	0	60	0,0		11,5	1	4		0,00	
	60	43	406,8		10,5		4	4	435,89	
	43	33	827,2		8,5		4	4	859,52	
	33	16	1.248,0		4,5		4	4	1.229,87	
	16	24	1.592,4		3,5		4	4	1.445,08	
	24	6	2.071,2		0,5		4	4	1.713,74	
	6	0	2.900,4	3.866,0	0		4	4	2.020,29	2.346,47

Tabela G – Resultados de C10

C10	$l = 17.336,4$ segundos									
	$c = 44.500$ R\$									
Rota	Trajeto		Tempo (s)		Payload (kg)	Tipo de bateria	Peso de Baterias (kg)		Energia (kJ)	
	i	j	t_i	a_i	y_{ij}	b_i	q_{ij}	ζ_i	f_i	z_i
Drone 1										
1	0	36	0,0		8	5	8		0,00	
	36	19	604,0		3		8	8	666,45	
	19	0	1.351,6	1.916,4	0		8	8	1.252,87	1.587,80
2	0	31			8	4	7		0,00	
	31	30	3.240,0		6,5		7	7	440,38	
	30	28	3.647,6		4,5		7	7	825,11	
	28	3	4.318,0		0,5		7	7	1.372,36	
	3	0	4.791,2	5.348,0	0		7	7	1.637,87	1.932,53
3	0	16			13	2	5		0,00	
	16	38	6.708,4		12		5	5	566,75	
	38	29	7.162,4		7		5	5	1.096,66	
	29	54	7.515,6		2,5		5	5	1.396,25	
	54	41	8.255,6		2		5	5	1.811,46	
	41	0	8.999,6	9.360,4	0		6	5	2.205,18	2.350,08
4	0	7			3	5	8		0,00	
	7	46	10.772,0		2,5		8	8	401,30	
	46	0	11.477,6	12.225,6	0		8	8	932,26	5.200,00
5	0	25			10	5	8		0,00	
	25	12	14.477,6		7		8	8	1.664,31	
	12	18	15.428,4		6,5		8	8	2.652,76	
	18	57	16.126,0		3,5		8	8	3.355,74	
	57	22	16.770,0		3		8	8	3.881,43	
	22	0	17.336,4	18.450,8	0		8	8	4.325,72	4.986,56
Drone 2										
6	0	33	0,0		10,5	3	6		0,00	
	33	45	423,6		6,5		6	6	480,91	
	45	48	1.480,0		5,5		6	6	1.410,65	
	48	58	2.098,8		4,5		6	6	1.915,78	
	58	17	2.675,2		3		6	6	2.349,52	
	17	0	3.092,8	4.922,4	0		6	6	2.623,80	3.475,29
7	0	20			8	4	7		0,00	
	20	24	6.254,4		6,5		7	7	449,11	
	24	2	6.692,0		3,5		7	7	862,16	
	2	37	7.578,8		3		7	7	1.529,47	
	37	1	8.622,8		1,5		7	7	2.281,78	
	1	35	9.507,2		1		7	7	2.834,44	

35	55	10.640,0		0,5		7	7	3.506,19	
55	0	11.192,0	12.323,6	0		7	7	3.815,92	4.414,76

Tabela H – Resultados de C11

Rota	Trajeto		Tempo (s)		Payload (kg)	Tipo de bateria	Peso de Baterias (kg)		Energia (kJ)	
	i	j	t_i	a_i	y_{ij}	b_i	q_{ij}	ζ_i	f_i	z_i
C11										
$l = 14.385,2$ segundos										
$c = 40.000$ R\$										
Drone 1										
1	0	31	0,0		9	4	7		0,00	
	31	10	423,6		7,5		7	7	467,40	
	10	61	804,8		6		7	7	815,54	
	61	11	1.762,8		5		7	7	1.725,23	
	11	18	2.554,8		4,5		7	7	2.397,01	
	18	45	3.428,8		1,5		7	7	3.110,45	
	45	4	3.820,8		0,5		7	7	3.355,41	
	4	0	4.522,0	5.676,0	0	7	7	3.748,86	4.550,00	
2	0	13			9,5	3	6		0,00	
	13	14	7.209,2		8		6	6	678,47	
	14	8	8.129,6		7		6	6	1.576,60	
	8	23	8.702,8		5,5		6	6	2.099,36	
	23	41	9.026,8		2		6	6	2.363,84	
	41	0	9.794,0	10.154,8	0		6	6	2.818,79	2.986,71
3	0	37			10	4	7		0,00	
	37	39	11.880,0		8,5		7	7	963,17	
	39	28	12.670,8		5		7	7	1.810,52	
	28	48	13.277,6		1		7	7	2.325,20	
	48	0	14.385,2	15.856,8	0		7	7	2.982,01	3.760,78
Drone 2										
4	0	55	0		3,5	8	11			
	55	7	1.131,6		3		11	11	1.140,31	
	7	52	2.066,8		2,5		11	11	2.052,88	
	52	50	2.629,6		1,5		11	11	4.864,30	
	50	9	3.288,0		0,5		11	11	5.443,76	
	9	0	4.350,8	5.420,0	0		11	11	6.311,32	7.150,00
5	0	3			12,5	2	5			
	3	53	6.876,8		12		5	5	667,66	
	53	12	7.434,4		11		5	5	1.318,49	
	12	63	7.796,0		10,5		5	5	1.717,48	
	63	42	8.287,2		10		5	5	2.243,80	
	42	0	8.638,0	9.165,2	0		5	5	2.608,49	3.250,00

6	0	60			2,5	1	4			
	60	54	10.472,0		1,5		4	4	202,30	
	54	57	11.320,4		1		4	4	570,08	
	57	51	12.507,6		0,5		4	4	1.046,86	
	51	0	13.644,8	13.956,0	0		4	4	1.467,29	2.600,00

Tabela I – Resultados de C12

C12	$l = 21.588,8$ segundos									
	$c = 53.500$ R\$									
Rota	Trajeto		Tempo (s)		Payload (kg)	Tipo de bateria	Peso de Baterias (kg)		Energia (kJ)	
	i	j	t_i	a_i	y_{ij}	b_i	q_{ij}	ζ_i	f_i	z_i
Drone 1										
1	0	22	0,0		3	9	12		0,00	
	22	0	1.114,4	2.228,8	0		12	12	1.158,53	2.103,76
2	0	34			11	2	5		0,00	
	34	63	3.713,2		9,5		5	5	644,83	
	63	40	4.087,2		9		5	5	1.021,71	
	40	51	4.436,8		4		5	5	1.362,85	
	51	5	4.920,8		3,5		5	5	1.680,74	
	5	25	5.830,4		3		5	5	2.249,15	
25	0	6.570,4	7.922,4	0	5	5	2.687,97	3.230,93		
3	0	23			9	3	9		0,00	
	23	43	9.621,6		5,5		9	9	983,82	
	43	46	10.393,2		3,5		9	9	1.761,36	
	46	54	11.180,0		1		9	9	2.453,82	
	54	2	11.514,0		0,5		9	9	2.694,50	
	2	0	11.985,2	12.720,4	0		9	9	3.019,02	3.501,89
4	0	8			5,5	8	11		0,00	
	8	27	14.440,0		4		11	11	930,49	
	27	0	15.426,8	16.060,8	0		11	11	1.956,37	2.453,68
5	0	3			9	3	6		0,00	
	3	44	17.517,6		8,5		6	6	578,85	
	44	9	18.045,2		0,5		6	6	1.110,51	
	9	0	18.765,2	19.834,4	0		6	6	1.468,57	1.966,17
6	0	42			10,5	3	6			
	42	7	21.261,6		0,5		6	6	598,53	
	7	0	21.588,8	22.100,4	0		6	6	761,25	999,35
Drone 2										
7	0	24	0,0		7,5	7	10		0,00	
	24	19	569,2		4,5		10	10	682,53	
	19	58	1.089,2		1,5		10	10	1.206,53	
	58	0	2.735,6	4.458,0	0		10	10	2.550,49	3.791,65

8	0	38			11,5	3	6		0,00	
	38	61	5.712,4		6,5		6	6	424,96	
	61	11	6.429,6		5,5		6	6	1.056,17	
	11	53	7.221,6		5		6	6	1.702,68	
	53	28	7.762,4		4		6	6	2.126,88	
	28	0	8.156,8	8.821,2	0		6	6	2.411,09	2.720,30
9	0	47			7	2	5		0,00	
	47	59	10.835,6		5		5	5	945,23	
	59	33	11.322,4		4		5	5	1.513,43	
	33	0	12.464,4	12.888,0	0		5	5	2.773,51	3.132,81

Tabela J – Resultados de C13

C13	$l = 14.273,2$ segundos									
	$c = 51.500$ R\$									
Rota	Trajeto		Tempo (s)		Payload (kg)	Tipo de bateria	Peso de Baterias (kg)		Energia (kJ)	
	i	j	t_i	a_i	y_{ij}	b_i	q_{ij}	ζ_i	f_i	z_i
Drone 1										
1	0	49	0,0		8,5	5	8		0,00	
	49	32	510,8		8		8	8	579,91	
	32	14	1.086,4		7		8	8	1.215,03	
	14	5	1.804,8		6		8	8	1.961,88	
	5	25	2.244,4		5,5		8	8	2.390,84	
	25	52	2.984,4		2,5		8	8	3.089,32	
	52	61	4.125,2		1,5		8	8	3.947,78	
	61	54	4.623,6		0,5		8	8	4.291,02	
	54	0	4.998,0	5.740,4	0	8	8	4.524,99	5.200,00	
2	0	46			13,5	1	4		0,00	
	46	16	7.388,4		11		4	4	896,93	
	16	42	8.061,2		10		4	4	1.596,37	
	42	0	8.431,6	8.958,8	0		4	4	1.957,81	2.135,89
3	0	51			12,5	2	9		0,00	
	51	44	10.170,0		12		9	5	373,16	
	44	28	10.844,0		4		9	5	1.159,85	
	28	0	11.206,8	11.871,2	0		9	5	1.398,14	3.250,00
4	0	63			3	6	9			
	63	7	13.296,8		2,5		9	9	0,00	
	7	41	13.626,8		2		9	9	715,19	
	41	0	14.086,8	14.447,6	0		9	9	1.076,02	5.850,00
Drone 2										
5	0	22	0,0		7	6	9		0,00	
	22	53	1.114,4		4		9	9	1.229,63	
	53	50	1.906,8		3		9	9	1.952,30	

	50	3	2.658,4		2		9	9	2.589,80	
	3	55	3.209,2		1,5		9	9	3.021,85	
	55	9	4.166,0		1		9	9	3.741,84	
	9	35	4.797,6		0,5		9	9	4.196,98	
	35	0	5.190,0	6.221,6	0		9	9	4.467,22	5.850,00
6	0	36			8,5	5	8		0,00	
	36	23	7.725,6		3,5		8	8	685,72	
	23	0	8.220,8	9.020,0	0		8	8	1.089,95	5.200,00
7	0	29			6	9	12		0,00	
	29	13	10.222,8		1,5		12	12	372,75	
	13	0	10.857,6	11.490,8	0		12	12	971,94	7.800,00
8	0	57			1,5	5	8		0,00	
	57	48	13.538,8		1		8	8	790,63	
	48	0	14.273,2	15.744,8	0		8	8	1.272,98	2.145,64

Tabela K – Resultados de C14

C14	$l = 14.097,6$ segundos									
	$c = 43.000$ R\$									
Rota	Trajeto		Tempo (s)		Payload (kg)	Tipo de bateria	Peso de Baterias (kg)		Energia (kJ)	
	i	j	t_i	a_i	y_{ij}	b_i	q_{ij}	ζ_i	f_i	z_i
Drone 1										
1	0	57			9,5	5	8		0,00	
	57	14	1.148,0		9		8	8	1.376,57	
	14	28	1.854,4		8		8	8	2.201,08	
	28	15	2.290,4		4		8	8	2.682,16	
	15	1	3.054,4		3,5		8	8	3.330,18	
	1	22	3.404,4		3		8	8	3.615,89	
	22	0	4.497,6	5.612,0	0		8	8	4.473,40	5.134,23
2	0	32			9,5	3	6		0,00	
	32	33	6.897,6		8,5		6	6	413,17	
	33	12	7.236,4		4,5		6	6	754,58	
	12	23	7.856,4		4		6	6	1.221,13	
	23	5	8.477,2		0,5		6	6	1.668,48	
	5	0	9.024,8	9.944,4	0		6	6	1.940,80	2.368,78
3	0	36			12	2	5		0,00	
	36	54	11.448,4		7		5	5	704,99	
	54	27	11.999,6		6,5		5	5	1.172,52	
	27	63	13.020,4		2,5		5	5	2.005,80	
	63	43	13.647,6		2		5	5	2.357,72	
	43	0	14.097,6	14.502,8	0		5	5	2.595,86	2.758,59
Drone 2										
4	0	10			8	7	10			

	10	30	500,0		6,5		10	10	615,50	
	30	2	984,8		4,5		10	10	1.165,89	
	2	37	1.736,0		4		10	10	1.922,88	
	37	46	2.780,0		2,5		10	10	2.941,61	
	46	0	3.727,6	4.475,6	0		10	10	3.775,60	4.314,60
5	0	19			8	4	7			
	19	34	5.940,4		5		7	7	587,17	
	34	59	6.512,4		3,5		7	7	1.072,34	
	59	58	7.471,6		2,5		7	7	1.794,13	
	58	52	8.256,4		1		7	7	2.334,63	
	52	0	9.801,2	10.463,2	0		7	7	3.250,69	3.601,02
6	0	50			8	7	10			
	50	29	11.670,0		7		10	10	377,67	
	29	4	11.974,8		2,5		10	10	733,43	
	4	56	13.127,2		2		10	10	1.747,66	
	56	0	13.520,0	14.665,6	0		10	10	2.080,83	2.906,35

ANEXO A – LISTA DE HOSPITAIS

**Tabela A.A – Lista de hospitais com seus respectivos IDs, localizações e demandas
(Adaptado de Haddad e Pimenta, 2019)**

ID	Nome	Latitude	Longitude	Demanda de bolsas de sangue	Demanda de bolsas de sangue em kg
1	Smsdc Hospital Mun. Rocha Maia	-22,953295	-43,176967	1	0,5
2	Smsdc Rio Hospital Municipal Paulino Werneck	-22,810765	-43,184125	1	0,5
3	Ini Fiocruz Ipec	-22,878662	-43,243013	1	0,5
4	Smsdc Rio Hospital Mun. Raphael Paula E Souza	-22,954237	-43,391983	1	0,5
5	Smsdc Rio Mater Herculano Pinheiro	-22,870486	-43,334789	1	0,5
6	Smsdc Rio Hosp. Mun. Francisco Da S. Telles	-22,830674	-43,328061	1	0,5
7	Smsdc Rio Hospital Municipal Barata Ribeiro	-22,900497	-43,240377	1	0,5
8	Hospital Mario Kroeff	-22,833836	-43,286943	3	1,5
9	Smsdc Rio Matern. Alexander Fleming	-22,864737	-43,370899	1	0,5
10	Ses Rj Iecac Inst Est De Cardiologia Aloysio De Castro	-22,953068	-43,199578	3	1,5
11	Sms Rio H. M. Jesus	-22,911734	-43,243511	1	0,5
12	Smsdc Rio Matern. Carmela Dutra	-22,911187	-43,290783	1	0,5
13	Ms Hospital De Ipanema	-22,983908	-43,195817	3	1,5
14	Smsdc Rio Hospital Da Piedade	-22,891821	-43,309727	2	1,0
15	Fiotec Iff Instituto Fernandes Figueira	-22,942263	-43,174236	1	0,5
16	Smsdc Rio Hospital Maternidade Fernando Magalhães	-22,895109	-43,225763	2	1,0
17	Ses Hospital Estadual Rocha Faria	-22,908235	-43,562386	6	3,0
18	Ses Rj Hecc - Hospital Estadual Carlos Chagas	-22,865368	-43,374086	6	3,0
19	Ms Hospital Federal Da Lagoa	-22,963636	-43,215711	6	3,0

20	Hugg - Hospital Universitário Gaffrée E Guinle	-22,916187	-43,220837	3	1,5
21	Smsdc Rio Hospital Municipal Ronaldo Gazolla	-22,825324	-43,347589	4	2,0
22	Smsdc Rio Hospital Mun. Lourenço Jorge	-22,994959	-43,365063	6	3,0
23	Ses Rj Hospital Estadual Getúlio Vargas	-22,838971	-43,285011	7	3,5
24	Hospital Federal Do Andaraí	-22,927229	-43,252156	6	3,0
25	Ses Rj Hospital Estadual Albert Schweitzer	-22,866882	-43,441932	6	3,0
26	Smsdc Rio Hospital Municipal Pedro Ii	-22,912824	-43,687788	6	3,0
27	Smsdc Rio Hospital Municipal Miguel Couto	-22,977420	-43,223747	8	4,0
28	Smsdc Rio Hospital Mun. Salgado Filho	-22,900587	-43,277966	8	4,0
29	Smsdc Rio Hospital Municipal Souza Aguiar	-22,908520	-43,190205	9	4,5
30	Ms Inca Hospital Do Câncer I	-22,912564	-43,188625	4	2,0
31	Ms Inc Instituto Nacional De Cardiologia	-22,936813	-43,190462	3	1,5
32	Ms Inca Ii Hospital Do Câncer Ii	-22,899885	-43,208141	2	1,0
33	Ms Inst. Nacional De Traumatologia E Ortopedia Jamil Haddad	-22,893894	-43,215058	8	4,0
34	MS INCA HOSPITAL DO CÂNCER III E IV	-22,916676	-43,258485	3	1,5
35	Ses Rj Hospital Estadual Da Criança	-22,885099	-43,366087	1	0,5
36	Ms Hospital Geral De Bonsucesso	-22,867279	-43,248593	10	5,0
37	Ms Hospital Federal Cardoso Fontes	-22,925686	-43,316305	3	1,5
38	Ms Hse Hospital Federal Dos Servidores Do Estado	-22,896689	-43,188282	10	5,0
39	Hucff - Hospital Universitário Clementino Fraga Filho	-22,842394	-43,237509	7	3,5
40	Hupe - Hospital Universitário Pedro Ernesto	-22,914723	-43,236748	10	5,0
41	Hospital Central Da Policia Militar Do Estado Do Rio De Janeiro	-22,912928	-43,203799	4	2,0
42	Hospital Central Do Exército	-22,894787	-43,242908	20	10,0
43	Hospital Central Da Aeronáutica	-22,921014	-43,211719	4	2,0

44	Hospital Naval Marcilio Dias	-22,913868	-43,283353	16	8,0
45	Hospital Geral Do Rio De Janeiro	-22,863765	-43,396401	2	1,0
46	Hospital Da Força Aérea Do Galeão	-22,811272	-43,218168	5	2,5
47	Hospital De Aeronáutica Dos Afonsos	-22,884258	-43,386301	4	2,0
48	Smsdc Rio Hospital Municipal Da Mulher Mariska Ribeiro	-22,876163	-43,472917	2	1,0
49	Ufrj Instituto De Neurologia Deolindo Couto	-22,955136	-43,177363	1	0,5
50	Smsdc Rio Maternidade Maria Amélia Buarque De Hollanda	-22,908898	-43,191303	2	1,0
51	Ufrj Instituto De Ginecologia	-22,909238	-43,192309	1	0,5
52	Ufrj Inst. De Puer. Ped. Martagão Gesteira	-22,841184	-43,239049	2	1,0
53	Smsdc Rio Inst. Mun. Nise Da Silveira	-22,901004	-43,301004	2	1,0
54	Smsdc Rio Hospital Mun. N. S. Do Loreto	-22,814721	-43,225555	1	0,5
55	Smsdc Rio Hospital Municipal Jurandyr Manfredini	-22,937523	-43,389946	1	0,5
56	Smsdc Rio Imas Juliano Moreira	-22,933357	-43,393991	4	2,0
57	Smsdc Rio Hospital Mun. Álvaro Ramos Ap 4 0	-22,940898	-43,393451	1	0,5
58	Ses Rj Heer - Hospital Estadual Eduardo Rabello	-22,897828	-43,536052	3	1,5
59	Ses Rj Hesm - Hospital Estadual Santa Maria	-22,913535	-43,419119	2	1,0
60	Maternidade Escola Da Ufrj	-22,932716	-43,185253	2	1,0
61	Smsdc Rio Hospital Municipal Evandro Freire	-22,804867	-43,210835	2	1,0
62	Casa De Saúde Nossa Senhora Das Graças	-22,862693	-43,43659	1	0,5
63	Policlínica Piquet Carneiro	-22,906119	-43,244517	1	0,5