

Problema de locação de facilidade para logísticas: comparação entre drones e motos

Jefferson Costa de Matos^{1,2}, Eduardo A. A. G Macêdo^{1,2}, Vitor Venceslau Curtis¹ e Edson Luiz França Senne².

¹Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos/SP – Brasil

²Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP), São José dos Campos/SP – Brasil

Resumo — A aplicação efetiva de veículos aéreos não tripulados (VANTS), popularizados como drones, têm ganhado destaque em diversas áreas, especialmente devido a melhora das tecnologias embarcadas e redução de custos. Dentre as aplicações, se destaca o emprego de drones aéreos como veículos para a modalidade *last mile*, entrega de proximidade da cadeia logística, atraindo o interesse de grandes e pequenas empresas do setor. O presente estudo objetiva otimizar o posicionamento de centros de distribuição para entrega final ao cliente com o emprego de drones e comparando-o com o modal tradicional via motos, visando minimizar a soma de custos de locação dos galpões e operações de entrega. A cidade de São Paulo foi utilizada como escopo do estudo comparativo. Uma solução baseada em abordagens clássicas de Pesquisa Operacional, especificamente, o problema de localização de facilidades (FLP em inglês) com capacidade limitada é proposta como instrumento analítico para o estudo dos cenários propostos, permitindo a identificação das limitações técnicas e operacionais logísticas para aplicação de drones. Foi utilizada a metaheurística *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure* (GRASP) para a solução de instâncias maiores e os resultados obtidos demonstraram que a metaheurística proporcionou resultados bem próximos do ótimo para instâncias pequenas e que os drones podem ser vantajosos em relação às motos em determinados cenários.

I. INTRODUÇÃO

O uso de drones tem crescido com variadas aplicações, desde para o lazer, como simples capturas de imagens, até operações logísticas de proximidade com o cliente (*last mile*). No ambiente urbano brasileiro, as operações de delivery são executadas principalmente usando modais terrestres, como motos e carros, e possuem operadores com foco apenas no transporte final de mercadorias (iFood, Uber Eats, etc.), foco na última etapa da cadeia logística, e outros com uma cadeia mais verticalizada, possuindo estoques e grandes plataformas de negociação (Mercado Livre, Magazine Luiza, etc.).

Em ambos operadores, o transporte de mercadorias com veículos aéreos não tripulados (VANTS) autônomos têm sido amplamente estudado em todo mundo devido ao grande potencial econômico. Verri et al (2016) indicam que os custos com entregas de *last mile* podem chegar até 75% do dispêndio total da cadeia logística. Dentre os casos mais famosos, destaca-se o programa Prime Air da Amazon, onde há a estimativa de entrega de mercadorias em torno de 30 minutos.

Neste contexto, este trabalho objetiva analisar o potencial do emprego de VANTS para operações de *last mile* urbano em comparação com o modal terrestre tradicional através de técnicas de pesquisa operacional. Especificamente, é proposta uma modelagem baseada no problema de localização de facilidades (FLP em inglês) para atendimento da demanda logística na região da cidade de São Paulo considerando o custo de locação e localização de uma rede de centros de distribuição (CD).

Devido ao FLP ser um problema *NP-hard*, o problema proposto é solucionado de maneira exata e aproximada, para permitir uma comparação da perda de otimalidade e custo computacional, caso o método seja empregado em grandes instâncias. Por fim, os resultados são discutidos indicando os benefícios e limitações do emprego de drones no contexto *last-mile*.

II. REFERENCIAL TEÓRICO

Na literatura, os trabalhos que analisam entregas com drones focam no problema de roteamento de veículos (VRP), vide Murray e Chu (2015) e Schermer et al (2019). Há trabalhos de FLP com drones de entrega de produtos, contudo focando na instalação de estações de recarga para aumento de autonomia do VANT, como Shavarani et al (2017) e Lynskey et al (2019).

Este trabalho contribui com a literatura ao apresentar um novo caso comparando entregas com drones e motos.

III. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O modelo FLP é aplicado com capacidade limitada para cada CD e as seguintes suposições são estabelecidas de forma empírica baseadas em investigações do mercado. A entrega é realizada diretamente ao cliente partindo de um CD ao longo da malha. O deslocamento deve durar no máximo 30 minutos. O drone pode realizar exatamente uma entrega por viagem, enquanto a moto entrega 5 encomendas por vez. Os custos fixos de um CD relacionam-se à locação do imóvel e os custos variáveis são referentes às despesas de operação por entrega. O drone percorre a distância euclidiana entre o CD e o cliente, enquanto a moto percorre um múltiplo desta distância, especificamente 1,4 vezes. Os locais dos pontos de demanda são os mesmos candidatos a pontos de localização dos CDs. A demanda é determinística e estimada como proporcional à população da localidade, i.e., caso a população da região seja de 2 milhões de habitantes, então haverá 2 milhões de pedidos no mês.

A) Modelagem

A modelagem do FLP com capacidade limitada (Arenales et al, 2011) é descrita a seguir.

Parâmetros: J – conjunto de nós $j = 1, \dots, n$ que representam os clientes; I – conjunto de locais $i = 1, \dots, m$ candidatos à localização de facilidades; q_j – demanda do cliente j ; f_i – custo fixo de locação da facilidade no local i ; Q_i – capacidade da facilidade instalada no local i ; c_{ij} – custo variável da facilidade i para o atendimento da demanda do cliente j ; d_{ij} – distância do cliente j à facilidade i ; t_{ij} – tempo de deslocamento da facilidade i ao cliente j .

Variáveis de decisão: x_{ij} – fração da demanda q_j atendida pela facilidade localizada em i , $i \in I, j \in J$; x_{Bij} – variável binária que indica se há um arco ligando o galpão i ao cliente j , $i \in I, j \in J$; y_i – variável binária que indica se um CD é aberto ou não na localidade i .

Conjunto de restrições: a função objetivo (1) minimiza a soma dos custos de locação e custos variáveis; (2) asseguram que a demanda de cada cliente j é atendida; (3) garantem que, se uma instalação é aberta no local i , então a quantidade enviada de i para os cliente j é limitada pela capacidade Q_i ; (4) asseguram que o tempo de atendimento tenha um limite superior t_{max} ; (5) garantem que o pedido pode ser atendido pelo veículo, dada sua autonomia d_{max} (distância máxima permitida); (6) exige que a variável binária seja ativada se houver um arco ligando o galpão i a um cliente j ou, caso contrário, seja nula (M é um valor muito grande ou *Big number*); e (7) representam o domínio de cada variável.

$$(1) \min \sum_{i \in I} f_i y_i + \sum_{j \in J} c_{ij} x_{ij} \quad (2) \sum_{i \in I} x_{ij} = 1, \forall j \in J \quad (3) \sum_{j \in J} q_j x_{ij} \leq Q_i y_i, \forall i \in I$$

$$(4) x_{Bij} t_{ij} \leq t_{max}, \forall i \in I, \forall j \in J \quad (5) x_{Bij} d_{ij} \leq d_{max}, \forall i \in I, \forall j \in J$$

$$(6) x_{ij} \leq x_{Bij} \leq M x_{ij}, \forall i \in I, \forall j \in J \quad (7) y_i \in \{0, 1\}, 0 \leq x_{ij} \leq 1, x_{Bij} \in \{0, 1\}, \forall i \in I, \forall j \in J$$

B) Dados utilizados

O posicionamento geográfico das facilidades, clientes e dados populacionais foram coletados na base de dados da prefeitura de São Paulo. Os valores de locação tiveram como base sites e matérias sobre o mercado imobiliário (Zap Imóveis, Viva Real, etc.). A velocidade e alcance dos veículos foram definidas com base nas referências deste trabalho. A cidade de São Paulo foi dividida em 9 zonas, 32 subprefeituras e 96 bairros. Estas divisões foram usadas como pontos candidatos a CD e também como fonte de demanda dos clientes, parâmetro este relacionado a quantidade de habitantes de cada localidade. Cada topologia foi reticulada por malhas de 9x9, 32x32 e 96x96 unidades. Por fim, cada bairro

foi segmentado em 5 regiões para geração de um cenário de estresse para a malha 480x480 com intuito de testar os métodos exatos e heurísticos.

IV. RESULTADOS

Os resultados abaixo apresentam o custo da função objetivo, tempo médio de processamento e distribuição dos CD, usados nos testes exatos com o software AMPL e a plataforma NEOS, ambos com otimizador CPLEX. O algoritmo GRASP, implementado em Python, foi utilizada como metaheurística.

Tabela I – Comparação de Drone e Motos no Método Exato.

	DRONE		MOTO	
	Função Objetivo	Nr. Facilites	Função Objetivo	Nr. Facilites
Malha 9 x 9	R\$ 16.902.352	7	Inviável**	Inviável**
Malha 32 x 32	R\$ 13.831.119	10	R\$ 15.265.278	10
Malha 96 x 96	R\$ 12.518.216	10	R\$ 12.175.664	10
Malha 480 x 480	Não obtido*	Não obtido*	Não obtido*	Não obtido*

* Estourou a memória de 3MB disponível para otimização no NEOS e o tempo (24h) disponibilizado no AMPL
** Solução inviável para as restrições do problema

Tabela II – Comparação do Método exato e Heurístico.

	EXATO		HEURÍSTICA	
	Função Objetivo	Tempo Médio (s)	Função Objetivo Média *	Tempo Médio (s)
Malha 32 x 32	R\$ 13.831.119	6,4	R\$ 13.909.883	0,69
Malha 96 x 96	R\$ 12.518.216	9,6	R\$ 12.831.091	6,81
Malha 480 x 480	Não obtido**	Não obtido**	R\$ 11.890.389	521

* Média de 5 iterações
** Estourou a memória de 3MB disponível para otimização no NEOS e o tempo (24h) no AMPL ambos com CPLEX



Fig. 1 – Disposição dos CDs nas malhas 32x32, 96x96 e 480x480.

Motos são inviáveis na malha 9x9, devido a restrição de tempo, i.e., não atendem a demanda no tempo estipulado na região mais afastada, e possui custo pior na malha 32x32. Drones se tornam inviáveis na malha 9x9 ao reduzir sua autonomia de 30km para 20km, o que não é um problema para as tecnologias atuais. A configuração ótima da quantidade de CD é atingida a partir da malha 32x32, com custo muito próximo de malhas maiores. Para os parâmetros escolhidos, as motos se tornam mais vantajosas a partir da malha 96x96. A metaheurística GRASP foi mais veloz que o método exato, sendo capaz de resolver a malha 480x480, e apresentando custos para a função objetivo muito próximos do método exato: apenas 0,5% e 2,5% acima nas malhas 32x32 e 96x96, respectivamente.

III. CONCLUSÃO

Há cenários em que os drones podem ser vantajosos em relação à entrega convencional, em especial, conseguindo oferecer um serviço de entrega rápida. A metaheurística GRASP apresentou soluções próximas da ótima em todas instâncias testadas e foi capaz de resolver a malha 480x480, não resolvida pelo método exato, considerando os recursos computacionais utilizados. Trabalhos futuros podem analisar a sensibilidade do modelo para diversas velocidades, alcances e capacidade de transporte dos veículos.

REFERÊNCIAS

- Arenales, M. et al. Pesquisa Operacional: para cursos de engenharia. Rio de Janeiro: Elsevier: ABEPRO, 2011.
- C. C. Murray and A. G. Chu. The Flying Sidekick Traveling Salesman Problem: Optimization of Drone-assisted Parcel Delivery. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 54, 86-109, 2015.
- Schermer, D.; Moeinia, M.; Wendt, O. A Metaheuristic for the Vehicle Routing Problem with Drones and its Variants. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Volume 106, 2019, Pages 166-204, ISSN 0968-090X. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.06.016>. Acesso em 10/04/2021.
- Shavarani, S.M., Nejad, M.G., Rismanchian, F. et al. Application of hierarchical facility location problem for optimization of a drone delivery system: a case study of Amazon prime air in the city of San Francisco. Int J Adv Manuf Technol 95, 3141–3153 (2018). Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1363-1>. Acesso em 10/04/2021.
- Lynskey, J.; Thar, K.; Oo, T.Z.; Hong, C.S. Facility Location Problem Approach for Distributed Drones. Symmetry 2019, 11, 118. Disponível em: <://doi.org/10.3390/sym11010118>. Acesso em 15/06/2021.
- Desjardins, J. Amazon and UPS are betting big on drone delivery. Visual Capitalist Mar 11, 2018. Disponível em: <https://www.businessinsider.com/amazon-and-ups-are-betting-big-on-drone-delivery-2018-3>. Acesso em 10/04/2021.
- Verri F. A. N. et al. An Analysis on Tradable Permit Models for Last-Mile Delivery Drones," in IEEE Access, vol. 8, pp. 186279-186290, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3030612.
- Aguiar, M. O; Mauri, G. R.; Silva, R. F. Introdução aos Métodos Heurísticos de Otimização com Python. 1. ed. Alegre, ES: CAUFES, 2018.