

## OTIMIZAÇÃO BASEADA EM CHAVES ALEATÓRIAS PARA ROTEAMENTO DE DRONES EM OPERAÇÕES DE SOCORRO EM DESASTRES

Clara dos Santos Becker, Marcelo de Souza

### INTRODUÇÃO

O número de desastres, sejam naturais ou provocados pelo ser humano, vem aumentando com o passar dos anos (World Meteorological Organization, 2011). Seus efeitos são de grande escala, como bloqueios e interdições de vias de transporte. A complexa tomada de decisão envolve diferentes tarefas, um dos principais desafios sendo o planejamento de rotas para monitoramento da área afetada, busca e salvamento de vítimas. O uso de drones, i.e. veículos aéreos não tripulados, é uma solução eficiente para a busca de vítimas nesse cenário. Eles permitem ações de logística humanitária eficientes, seguras e de baixo custo em cenários de difícil acesso terrestre.

Este trabalho apresenta um estudo da aplicação de drones para a busca de vítimas em cenários de desastres, como enchentes e deslizamentos de terra. Em particular, o trabalho explora algoritmos de otimização para definir rotas, visando cobrir a área atingida na busca por sobreviventes. É apresentada uma modelagem baseada no problema do roteamento de veículos (VRP, de *vehicle routing problem*) (Kulkarni e Bhawe, 1985). Para a solução do problema, foram aplicados algoritmos de otimização por chaves aleatórias, através do *framework* Random-Key Optimizer (Chaves et al., 2024). A aplicação é demonstrada em um estudo e caso real, envolvendo as cheias que ocorreram no estado do Rio Grande do Sul em 2024.

### DESENVOLVIMENTO

A modelagem da aplicação foi baseada no VRP, um problema clássico de otimização combinatória. Sua proposta consiste em determinar as rotas mais eficientes para uma frota de veículos que deve atender um conjunto de clientes, de forma a minimizar o custo das rotas percorridas pelos veículos. Neste trabalho, os veículos são drones que devem visitar um conjunto de pontos de monitoramento em busca de vítimas. O objetivo é minimizar o tempo de viagem da rota mais longa, de modo que o tempo total de operação (todos os pontos visitados) seja mínimo.

Para a solução do VRP foi empregado o paradigma da otimização baseada em chaves aleatórias, que representa as soluções por vetores de números reais no intervalo  $[0,1)$ , chamados de chaves aleatórias. O decodificador, específico para a resolução do problema, mapeia um vetor de chaves aleatórias na solução correspondente. Assim, a busca por boas soluções é reduzida a um problema de otimização contínua de caixa preta. O *framework* Random-Key Optimizer (RKO), implementa essa abordagem com diferentes algoritmos heurísticos e paralelismo, promovendo busca colaborativa de soluções por meio de um *pool* de soluções elite. Para mapear soluções do VRP a chaves aleatórias, foi implementado um decodificador baseado nas ideias de Resende e Werneck (2015). Assume-se a existência de  $n$  pontos e  $m$  veículos. A solução por chaves aleatórias é representada por um vetor  $X$  com  $n + m$  posições. A Figura 1 apresenta a decodificação

do vetor de soluções, as primeiras  $n$  chaves estão associadas a cada um dos  $n$  pontos, enquanto as últimas  $m$  chaves se relacionam com os veículos.

Para demonstração da aplicação, através do estudo de caso real, foram mapeadas as áreas alagadas de Canoas, um dos municípios mais afetados pelas enchentes do estado do Rio Grande do Sul. As instâncias criadas possuem pontos a serem visitados pelos drones na operação de busca. Cada ponto é definido por uma coordenada geográfica e, portanto, corresponde a uma posição da área afetada, onde potencialmente há vítimas a serem socorridas. O Centro Olímpico Municipal de Canoas, localizado fora da área afetada, atua como base para operação de onde sai e para onde retornam os drones. Ao total foram geradas 15 instâncias, variando a posição dos pontos e a quantidade de drones. As instâncias possuem todas as combinações de  $n$  pontos e  $m$  drones para  $n \in \{10, 20, 40, 80, 160\}$  e  $m \in \{2, 4, 8\}$ . A distribuição dos pontos a serem visitados considera a densidade populacional e cada região da área afetada.

## RESULTADOS

As instâncias do estudo de caso foram resolvidas com 10 metaheurísticas, os resultados são apresentados na Tabela 1. Os algoritmos foram executados por 10 replicações, com 60 segundos (em tempo de CPU) de tempo limite de execução em cada replicação. Para instâncias menores, todos os algoritmos encontram a mesma solução em todas as replicações, potencialmente a solução ótima. Em instâncias maiores a diferença entre os algoritmos se torna mais notável.

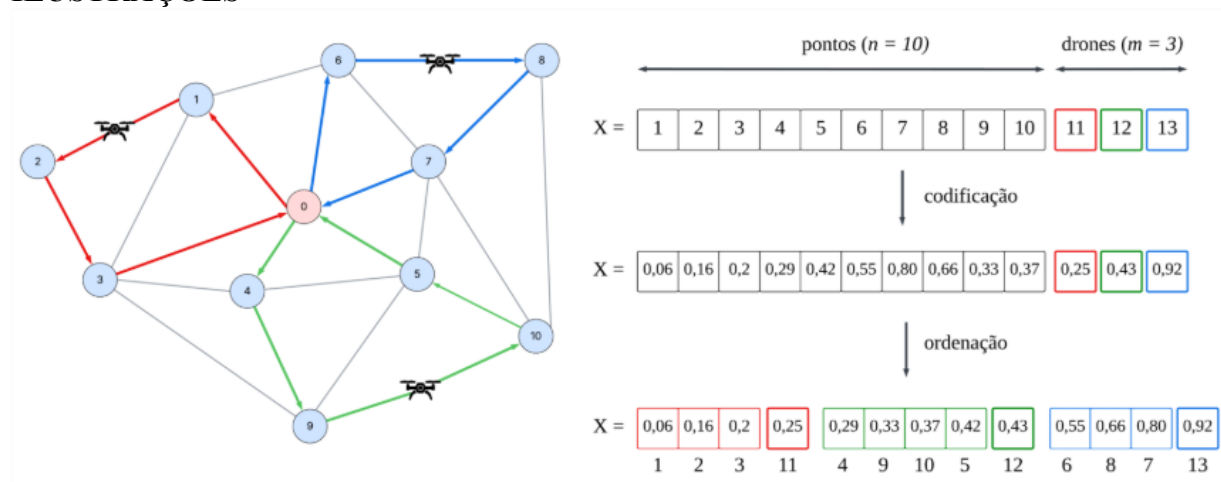
O algoritmo GRASP apresenta bom desempenho para instâncias maiores, como as de  $n = 160$ , obtendo bons resultados para diferentes quantidades de drones. O BRKGA-CS apresenta um bom desempenho em instâncias médias. O algoritmo RKO (que combina as metaheurísticas) também apresenta desempenho competitivo com os outros algoritmos, apresentando os melhores valores para todas as instâncias com  $n = 40$  e melhor valor para a última instância de maior complexidade  $n = 160$ . Cabe destacar que nenhuma das abordagens se mostra dominante ao considerar todas as instâncias, o que evidencia a qualidade dos algoritmos estudados.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo apresenta uma estratégia de busca por vítimas em áreas afetadas por desastres naturais. É apresentada uma modelagem desse tipo de cenário baseada no VRP. A geração de instâncias para roteamento de drones na resposta emergencial foi feita com dados reais, por meio de um estudo de caso das enchentes ocorridas no estado do Rio Grande do Sul. Os resultados da resolução das instâncias com 10 abordagens empregando otimização por chaves aleatórias evidenciam a eficácia do *framework* RKO, mostrando-se uma ferramenta robusta e flexível para a solução de problemas de roteamento.

**Palavras-chave:** Otimização por chaves aleatórias; Roteamento de drones; Operações de socorro em desastres.

## ILUSTRAÇÕES



**Figura 1.** Representação da solução do problema através do grafo e chaves aleatórias.

**Tabela 1.** Resultados do RKO e suas diferentes metaheurísticas para as instâncias estudadas. Para cada algoritmo, é apresentado as melhores soluções produzidas em 5 replicações. Os melhores valores para cada instância são apresentados em **negrito**.

Inst.	BRKGA	BRKGA	GA	GRASP	ILS	LNS	PSO	SA	VNS	RKO	
CS											
<i>n</i>	<i>m</i>										
40	2	0,623	0,624	<b>0,607</b>	0,614	0,623	0,635	0,623	<b>0,607</b>	0,623	<b>0,607</b>
40	4	0,424	<b>0,419</b>	<b>0,419</b>	0,420	0,427	0,428	0,428	0,424	<b>0,419</b>	<b>0,419</b>
40	8	<b>0,393</b>	<b>0,393</b>	<b>0,393</b>	<b>0,393</b>	<b>0,393</b>	<b>0,393</b>	<b>0,393</b>	<b>0,393</b>	<b>0,393</b>	<b>0,393</b>
80	2	0,810	<b>0,774</b>	0,823	0,782	0,875	0,828	0,795	0,924	0,815	0,835
80	4	0,532	0,543	0,531	0,516	<b>0,497</b>	0,529	0,506	0,568	0,544	0,535
80	8	<b>0,403</b>	0,420	0,404	0,407	0,404	<b>0,403</b>	0,405	0,440	0,404	0,410
160	2	1,251	1,349	1,116	<b>1,106</b>	1,155	1,203	1,197	1,783	1,193	1,174
160	4	0,773	0,818	0,694	<b>0,644</b>	0,669	0,665	0,714	1,264	0,692	0,723
160	8	0,556	0,611	0,484	0,477	0,485	0,491	0,490	0,883	0,494	<b>0,471</b>

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**CHAVES, A. A.** et al. A random-key optimizer for combinatorial optimization. *arXiv preprint*, arXiv:2411.04293, 2024a. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2411.04293>. Acesso em: 8 jul. 2025.

**KULKARNI, R. V.; BHAVE, P. R.** Integer programming formulations of vehicle routing problems. *European Journal of Operational Research*, v. 20, n. 1, p. 58–67, 1985.

**RESENDE, M. G. C.; WERNECK, R. F.** BRKGA for VRP. Pôster apresentado no *Amazon Machine Learning Conference*, Seattle, 2015.

**WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION.** *Atlas of mortality and economic losses from weather, climate and water-related hazards (1970–2019)*. Geneva: World Meteorological Organization, 2021.

---

#### DADOS CADASTRAIS

---

**BOLSISTA:** Clara dos Santos Becker

**MODALIDADE DE BOLSA:** PROIP/UDESC

**VIGÊNCIA:** 09/24 a 09/25 – Total: 12 meses

**ORIENTADOR(A):** Marcelo de Souza

**CENTRO DE ENSINO:** CEAVI

**DEPARTAMENTO:** Departamento de Engenharia de Software

**ÁREAS DE CONHECIMENTO:** Ciência da Computação / Metodologias e Técnicas da Computação

**TÍTULO DO PROJETO DE PESQUISA:** Projeto Automático de Algoritmos

**Nº PROTOCOLO DO PROJETO DE PESQUISA:** NPP4054-2022