

APLICAÇÃO DE UM ALGORITMO GRASP REATIVO PARA A ALOCAÇÃO E SEQUENCIAMENTO DE UNIDADES DE RESGATE

Victor Abu-Marrul Carneiro da Cunha¹

victor.cunha@tecgraf.puc-rio.br

Jéssica Kexin Sun¹

jjessica_sun@hotmail.com

Adriana Leiras¹

adrianaleiras@puc-rio.br

Luciana de Souza Pessoa¹

lucianapessoa@puc-rio.com

¹ Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (Puc-Rio)

R. Marquês de São Vicente, 225 – Gávea, Rio de Janeiro – RJ, 22451-900

Departamento de Engenharia Industrial (DEI)

RESUMO

Este artigo apresenta a aplicação de um algoritmo GRASP reativo para o problema de alocação e sequenciamento de unidades de resgate, tendo como base dados referentes ao desastre súbito ocorrido na Região Serrana do Rio de Janeiro, em 2011. A resolução deste problema consiste em designar unidades de resgate bem como definir a sequência de atendimento a incidentes que possuem diferentes graus de severidade, minimizando a soma dos instantes de conclusão do atendimento de cada incidente ponderada pela sua severidade. O método foi validado a partir de instâncias da literatura, referentes ao terremoto ocorrido em 2011 no Japão, sendo capaz de aprimorar as melhores soluções existentes em 1,08% em média, chegando a um ganho máximo de 3,07%, evidenciando sua capacidade em atender de forma eficiente ao problema estudado e auxiliar em um caso prático na redução de perdas ocasionadas por desastres súbitos.

PALAVRAS CHAVE. Metaheurística GRASP, Logística Humanitária, Desastres.

Tópicos: OA (Outras aplicações em PO), L&T (Logística e Transportes)

ABSTRACT

This paper presents an application of a reactive GRASP algorithm for the rescue units allocation and scheduling problem, based on data referring to the sudden disaster that occurred in the Mountain Region of Rio de Janeiro in 2011. The solution to this problem is to designate rescue units and define the sequence of attendance to incidents which have different levels of severity, minimizing the sum of the completion time of each incident weighted by its severity. We validate the method using instances of the literature, based on the 2011 earthquake in Japan, being able to improve the best existing solutions by 1.08% on average, reaching a maximum gain of 3.07%, evidencing its capacity to efficiently attend to the studied problem and to assist in a practical case by reducing losses caused by sudden disasters.

KEYWORDS. GRASP Metaheuristic, Humanitarian Logistics, Disasters.

Paper topics: OA (Other applications in OR), L&T (Logistics and Transportation)

1. Introdução

Nos últimos dez anos foram registrados, em média, 376 desastres por ano no mundo, com prejuízos de US\$ 137,5 bilhões, 224 milhões de pessoas afetadas e 70 mil mortes a cada ano [Guha-Sapir et al., 2017]. Desastre é uma ruptura severa no funcionamento de uma comunidade ou sociedade em qualquer escala, devido a eventos perigosos que interagem com condições de exposição, vulnerabilidade e capacidade, levando a um ou mais impactos ou perdas humanas, materiais, econômicas ou ambientais [UNISDR, 2018]. Além disso, são eventos complexos, severos e dinâmicos, com recursos limitados (humanos e materiais) e elevado nível de incerteza de informações, que podem não ser confiáveis, mesmo quando disponíveis [Celik et al., 2012]. Van Wassenhove [2006] classifica os desastres como naturais ou provocados pelo homem, ambos divididos ainda em súbito (como terremoto, tsunami, ataque terrorista) ou lento (como fome e seca extrema), conforme seu modo de início.

A resposta a desastres tem recebido atenção considerável em pesquisa desde o tsunami que afetou a Região do Pacífico em 2004, quando problemas na gestão de operações durante a resposta ao desastre culminaram na estabilização da Logística Humanitária como área de pesquisa [Leiras et al., 2014]. Nesse sentido, a logística humanitária (LH) pode ser definida como o processo de planejar, implementar e controlar o fluxo eficiente e econômico e o armazenamento de bens e materiais, bem como informações relacionadas, desde o ponto de origem até o ponto de consumo para atender às necessidades dos beneficiários [Thomas e Mizushima, 2005]. As operações típicas de preparação e resposta a desastres incluem a definição das localizações das instalações, gestão do inventário, evacuação de pessoas, transporte das vítimas e distribuição e alocação de alívio. Assim, a capacidade de conduzir operações humanitárias eficientes e eficazes é um elemento crítico de um processo de socorro a desastres.

No presente trabalho, o problema de alocação e sequenciamento de unidades de resgate (*Rescue Unit Assignment and Scheduling Problem - RUASP*) para o atendimento de incidentes ocasionados por desastres naturais é abordado. Este problema foi introduzido por Wex et al. [2014] que definiram um conjunto de instâncias, baseando-se em dados reais referentes ao terremoto ocorrido no ano de 2011 no Japão, e desenvolveram um algoritmo baseado na metaheurística GRASP para resolvê-las.

As principais contribuições desse trabalho consistem no aprimoramento do algoritmo GRASP proposto por Wex et al. [2014] e pela geração de um novo conjunto de instâncias a partir da coleta de dados reais do desastre ocorrido na região serrana do Rio de Janeiro em 2011 [Banco Mundial, 2012; Xavier, 2016; da Costa et al., 2017]. Os deslizamentos de terra ocorridos naquela região são considerados uma das maiores tragédias climáticas registradas no Brasil, causando mais de 900 mortes e afetando mais de 300.000 pessoas. Sete cidades decretaram estado de calamidade pública, enquanto outras nove foram diretamente afetadas após as fortes chuvas que atingiram 166 mm em dois dias na cidade mais afetada, representando 70% da chuva esperada para o mês. As consequências desse desastre desencadearam uma iniciativa para fortalecer a gestão do risco de desastres em nível nacional [Banco Mundial, 2012].

Além desta seção introdutória, este artigo apresenta outras cinco seções. A Seção 2 descreve o referencial teórico. A Seção 3 apresenta a descrição do problema, enquanto a Seção 4 descreve a abordagem de solução. Os experimentos computacionais são detalhados na Seção 5 e o artigo termina com as considerações finais na Seção 6.

2. Revisão bibliográfica

O campo da logística humanitária tem despertado crescente atenção por parte da comunidade científica. Relevantes trabalhos de revisão bibliográfica dedicam-se a diferentes aspectos desta área.

O estudo de Kovács e Spens [2007] tem como foco descobrir e descrever as características únicas da logística humanitária em operações de socorro a catástrofes. O objetivo do sua

pesquisa está na identificação dos atores, das fases e dos processos logísticos de modo a promover a compreensão do planejamento e realização de operações de logística no atendimento a desastres. Torre et al. [2012] concentram-se na revisão de problemas relacionados a determinação das rotas de veículos em regiões afetadas por tragédias naturais para entregar bens e serviços aos pontos de demanda. Para tanto, os autores realizaram entrevistas com representantes de organizações envolvidas com o atendimento a desastres e apresentaram os principais modelos de pesquisa operacional em transporte e distribuição de apoio a desastres.

A pesquisa de Altay e Green III [2006] explora o contexto da Pesquisa Operacional e Gerenciamento para identificar problemas decorrentes da gestão de catástrofes que ainda não tenham sido abordados e direcionar pesquisas futuras nesta área. Dando continuidade a este estudo, o artigo de [Galindo e Batta, 2013] apresenta um levantamento da literatura sobre pesquisa recente, considerando 155 trabalhos no período de 2005-2010, com o objetivo de avaliar como a pesquisa evoluiu ao longo dos anos e em que medida as lacunas importantes na literatura identificadas por [Altay e Green III, 2006] foram cobertas, fornecendo, a partir das descobertas, sugestões para a abordagem de áreas inexploradas.

Diante da necessidade de alocação urgente de recursos para atendimento a desastres, a aplicação de métodos heurísticos e metaheurísticos na resolução de problemas de otimização combinatória, no contexto da logística humanitária, se justifica pela sua capacidade de encontrar soluções de boa qualidade em reduzido tempo computacional [Gendreau e Potvin, 2010].

Heurísticas baseadas em busca local partem de uma solução inicial e exploram sua vizinhança em busca de soluções aprimorantes. Talarico et al. [2015] propõem duas formulações matemáticas e uma meta-heurística *Large Neighbourhood Search (LNS)* para determinar rotas de ambulância, em um cenário de resposta a desastres, que minimizem o tempo de conclusão do serviço, reduzindo o tempo de espera enfrentado pelos pacientes. Nos estudos relatados por Sze et al. [2017], *LNS* também é utilizado, sendo incorporado como estratégia de diversificação a um algoritmo de *Adaptive Variable Neighbourhood Search (AVNS)* de duas etapas para resolução de um problema cumulativo do roteamento de veículo com restrição de capacidade. O objetivo é minimizar a soma dos tempos de chegada nos clientes, ao invés da distância total da rota. Apesar de a literatura para este problema ser escassa, os autores indicam que este problema tem aplicação útil na área de fornecimento de ajuda humanitária à população após um desastre natural.

Heurísticas baseadas em *Differential Evolution (DE)* e *Particle Swarm Optimization (PSO)* foram propostas por Korkou et al. [2016] para a minimização de perdas causadas pelo desajuste entre oferta e demanda de recursos nas áreas afetadas, levando em consideração a importância dos recursos, a capacidade de carga dos veículos e as restrições de capacidade rodoviária impostas pela autoridade.

Algoritmos de *Ant Colony Optimization (ACO)* foram apresentados por [Yi e Kumar, 2007] para resolução do problema de logística decorrente de processos de atendimento aos desastres. O objetivo é determinar a rota dos veículos responsáveis pela distribuição de commodities para as áreas afetadas e transporte de pessoas feridas para os centros médicos.

A metaheurística *GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure)* também tem sido utilizada no contexto da logística humanitária. O estudo feito por Duque e Sörensen [2011] trata do plano de reparação da infraestrutura de transporte danificada por desastres naturais, tendo como objetivo determinar como os recursos escassos para reparação devem ser alocados a fim de otimizar o desempenho da rede, respeitando o orçamento e as limitações de tempo. Foi aplicada uma solução baseada nas meta-heurísticas *GRASP* e *Variable Neighbourhood Search (VNS)* a um conjunto de instâncias de tamanhos pequeno, médio e grande, demonstrando sua eficiência. Ferrer et al. [2016] desenvolveram e testaram um algoritmo construtivo e uma meta-heurística baseada em *GRASP* em um estudo de caso baseado no terremoto ocorrido no Haiti em 2010. Seu objetivo era a determinação dos itinerários dos veículos que transportam para a população os bens demandados localizados nos depósitos, considerando o custo e o tempo de operação, e a segurança das rotas.

Wex et al. [2014] sugerem um modelo de apoio à decisão para centros de operações de emergência que aloca unidades de resgate disponíveis para atender incidentes com diferentes prioridades de acordo com sua severidade. Utilizando a literatura em programação e roteamento, são propostas e comparadas computacionalmente uma heurística baseada em Monte-Carlo, heurísticas construtivas, de melhoria e meta-heurísticas GRASP.

3. Descrição do problema

O problema de alocação e sequenciamento de unidades de resgate (RUASP) consiste na programação de um conjunto de unidades de resgate M ($1 \leq k \leq m$) para o atendimento de um conjunto de incidentes N ($1 \leq i, j \leq n$), com o objetivo de minimizar o impacto causado por um desastre súbito. De acordo com Wex et al. [2014], o problema pode ser modelado como um problema de programação de máquinas paralelas não relacionadas (R) com tempo de *setup* dependente da unidade e da sequência (s_{ijk}). Nesse caso, as máquinas representam as unidades de resgate e as tarefas que devem ser atendidas são os incidentes. O tempo de processamento de um incidente depende da unidade que irá atendê-lo e é definido pelo parâmetro p_{ik} , sendo essa a característica que define um problema com máquinas não relacionadas. O tempo de *setup* no RUASP corresponde ao tempo que uma unidade leva para se preparar para o atendimento a um incidente somado ao tempo de deslocamento para chegar a esse incidente, seja saindo da base ou do local de atendimento de outro incidente. Isso faz com que essa duração seja variável de acordo com a unidade que se desloca e do local de partida para o atendimento do incidente.

No RUASP, um determinado incidente só pode ser atendido por um subconjunto de unidades de resgate aptas a atendê-lo. Esse subconjunto é definido como M_i e contém as máquinas k aptas a atenderem um incidente i . Além disso, cada incidente possui um fator de destruição $w_i \in \{1; 2; 3; 4; 5\}$ associado ao seu nível de severidade, sendo $w_i = 1$ para incidentes menos críticos e $w_i = 5$ para incidentes graves.

O objetivo da programação de unidades de resgate é atender os incidentes de forma eficiente, levando em consideração o seu nível de criticidade e o instante de conclusão do seu atendimento (C_i). Dessa forma a função de avaliação proposta para o problema visa minimizar a soma dos instantes de conclusão do atendimento de cada incidente multiplicados pelo seu nível de severidade ($\sum w_i C_i$). De acordo com a literatura de programação esse problema é da classe NP-difícil e é denotado como $R|s_{ijk}, M_i| \sum w_i C_i$. Outras características e restrições do RUASP são listadas a seguir:

- Cada incidente deve ser programado apenas uma vez;
- Uma unidade só pode atender a um incidente por vez;
- Não existem restrições de precedência entre os incidentes;
- Não são programadas interrupções no atendimento a um incidente (modelo sem preempção).

4. Abordagem de Solução

Para tratar o RUASP, foi implementado um GRASP reativo onde as fases construtiva e de busca local do GRASP foram feitas com base nos melhores métodos propostos por Wex et al. [2014]. Os autores testaram 8 heurísticas construtivas e 5 buscas locais para lidar com o RUASP. No presente trabalho foram utilizadas para o GRASP reativo aquelas que apresentaram os melhores resultados, sendo elas a heurística construtiva *Sched 7* e a busca local com a vizinhança *3-node exchange*. O método foi aplicado em dados do desastre natural ocorrido em 2011 no estado do Rio de Janeiro [Banco Mundial, 2012; Xavier, 2016; da Costa et al., 2017] e a partir de instâncias propostas por Wex et al. [2014], relativas ao terremoto ocorrido no Japão também em 2011. Mais detalhes sobre a heurística, a busca local e o GRASP reativo, utilizados nesse trabalho, são dados a seguir.

4.1. Heurística *Sched 7*

A heurística *Sched 7* define a alocação iterativamente, selecionando o incidente e a unidade que irá atendê-lo no mesmo passo. Usando C_k para definir o instante de conclusão parcial de uma unidade k , δ_k para armazenar o último incidente atribuído a uma unidade k e σ_k para representar a sequência programada em cada unidade k , a heurística retorna $\sigma = (\sigma_1, \dots, \sigma_m)$, como uma lista de programações para as m unidades, como descrito no algoritmo 1.

Algorithm 1 Heurística *Sched 7* [Wex et al., 2014]

- 1: Inicializa o instante de conclusão de cada unidade de resgate, as unidades partindo do depósito e a lista vazia de alocação de cada unidade
 $C_k \leftarrow 0, \delta_k \leftarrow 0, \sigma_k \leftarrow 0, \forall k \in M.$
 - 2: Inicializa a lista de incidentes não alocados $I \leftarrow \{1, \dots, n\}$
 - 3: Define $C \leftarrow \left\{ \frac{C_k + s_{\delta_k i k} + p_{ik}}{w_i} \mid i \in N, k \in M \right\}$ e
 $c \leftarrow \min_{i,k} \frac{C_k + s_{\delta_k i k} + p_{ik}}{w_i}$
 - 4: **for** $l = 1$ **to** n **do**
 - 5: Seleciona o incidente $i^* \in I$ e a unidade $k^* \in M$ correspondente a c , onde a relação entre o instante de conclusão e o nível de criticidade é o menor. Se não existir um mínimo, retorna como inviável.
 - 6: Atualiza $I \leftarrow I \setminus \{i^*\}, C_{k^*} \leftarrow C_{k^*} + s_{\delta_{k^*} i^* k^*} + p_{i^* k^*},$
 $\delta_{k^*} \leftarrow i^*$ e $\sigma_{k^*} \leftarrow \sigma_{k^*} \cup \{i^*\}$
 - 7: Atualiza $C \leftarrow \left\{ \frac{C_k + s_{\delta_k i k} + p_{ik}}{w_i} \mid i \in N, k \in M \right\}$ e
 $c \leftarrow \min_{i,k} \frac{C_k + s_{\delta_k i k} + p_{ik}}{w_i}$
 - 8: **end for**
 - 9: **retorna** $\sigma \leftarrow (\sigma_1, \dots, \sigma_m)$
-

4.2. Busca Local com 3-nodes exchange

O algoritmo de busca local implementado utiliza a vizinhança *3-nodes exchange*, proposta por Wex et al. [2014] para o RUASP, onde a troca de arcos utilizada comumente em problemas de roteamento é substituída por uma troca de nós (do inglês *nodes*) a fim de evitar que sejam geradas soluções inviáveis para o problema, dada as diferentes elegibilidades das unidades de resgate. Um exemplo do *3-node exchange* com três unidades de resgate (k_1, k_2 e k_3) e três incidentes (A, B e C) é demonstrado na Figura 1.

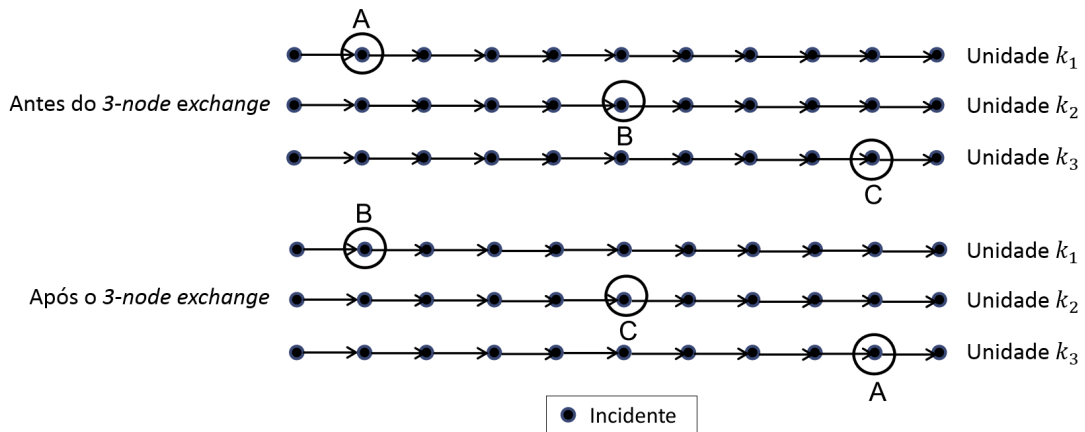


Figura 1: Exemplo do *3-node exchange* com três unidades de resgate [Wex et al., 2014].

No caso do RUASP, os nós são os incidentes e durante a busca local três deles são trocados de posição entre si ao longo de todo o cronograma, ou seja, é permitida a troca de incidentes entre diferentes unidades de resgate contanto que a restrição de elegibilidade seja assegurada. Todas as permutações são testadas para o conjunto de incidentes programados seguindo-se uma estratégia de *best improvement*, na qual, avaliam-se todas as soluções dentro da vizinhança, tornando corrente a solução de menor custo dentre todas elas. O algoritmo é interrompido quando nenhuma solução vizinha possuir custo menor que a solução corrente.

4.3. GRASP Reativo

A metaheurística GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedures*), proposta originalmente por Feo e Resende [1989], corresponde a um processo iterativo de duas fases. Na primeira fase, uma solução viável é construída a partir de um algoritmo guloso aleatorizado e na segunda fase, uma busca local é aplicada sobre a solução corrente, gerada pela primeira fase. O algoritmo retorna a melhor solução encontrada dentre todas as iterações efetuadas. No presente trabalho, utilizou-se a heurística *Sched 7* na fase construtiva do GRASP e a busca local com a vizinhança *3-node exchange* para melhoria das soluções construídas, descritas nas Seções 4.1 e 4.2, respectivamente.

O procedimento de construção de uma solução viável no GRASP é feito elemento a elemento, ou seja, um elemento que compõe a solução é escolhido, a cada passo do algoritmo, a partir de uma lista de elementos candidatos. Cada um desses elementos possui um custo associado à decisão de incluí-lo na solução parcial. No caso da heurística *Sched 7*, utilizada para tratar o RUASP, um elemento da solução corresponde a um par incidente/unidade que avalia o custo de cada incidente ser alocado a cada unidade capaz de atendê-lo, conforme descrito na Seção 4.1.

Para definir o elemento que fará parte da solução, a cada iteração, o GRASP utiliza um algoritmo guloso aleatorizado, definindo uma lista restrita de candidatos (LRC) contendo os melhores elementos. Diferentemente de um método puramente guloso, onde apenas o elemento de menor custo pode ser escolhido, no GRASP qualquer elemento da LRC pode ser escolhido com igual probabilidade. Os elementos que entram ou não na lista são limitados a partir de um parâmetro $\alpha \in [0; 1]$, que pode tornar o método mais ou menos guloso. De posse do custo de entrada de cada um dos elementos candidatos, os custos mínimo (c_{min}) e máximo (c_{max}) podem ser computados. Os elementos que compõe a LRC devem ter seu custo de entrada avaliado no intervalo definido por $[c_{min}; c_{min} + \alpha(c_{max} - c_{min})]$. Percebe-se que quando α se aproxima de zero o método tende a ser mais guloso e conforme se afasta, mais diversificado fica, se tornando totalmente aleatório quando $\alpha = 1$. Quando um novo elemento é incluído na solução parcial, o custo de cada um dos elementos candidatos restantes deve ser recalculado. Após a construção da solução completa, onde no caso do RUASP consiste em uma programação que atenda a todos os incidentes respeitando as restrições do problema, uma busca local é aplicada a fim de melhorar a solução construída, já que essas soluções podem não ser ótimos locais.

Para lidar com os diferentes portes de instâncias do RUASP, é proposto no presente trabalho a utilização de uma abordagem reativa para atualização do valor de α . No GRASP reativo, proposto por Prais e Ribeiro [2000], todas as características do GRASP descritas acima são mantidas, porém, uma estratégia de ajuste automático do valor de α é utilizada. Dessa forma, define-se um conjunto discreto, com r elementos, de valores possíveis para $\alpha \in \{\alpha_1; \alpha_2; \dots; \alpha_r\}$, com probabilidade $p_i, i = 1, \dots, r$ associadas a cada elemento do conjunto. A princípio, definem-se probabilidades iguais para todos os elementos, com $p_i = 1/r$. Conforme o algoritmo é executado estas probabilidades são atualizadas com base na qualidade das soluções desenvolvidas para cada valor de α no momento da avaliação. O valor da melhor solução encontrada entre todas as iterações do método, até o momento da avaliação, é definido como f^* e o valor médio das soluções encontradas para α_i é definido como μ_i . Desta forma, as probabilidades da escolha de cada valor de α são atualizadas de acordo com as Equações 1 e 2.

$$p_i = q_i / \sum_{j=1}^r q_j, i = 1, \dots, r \quad (1)$$

$$q_i = \left(\frac{f^*}{\mu_i} \right)^\delta, i = 1, \dots, r \quad (2)$$

5. Experimentos computacionais

O algoritmo GRASP proposto, incluindo a heurística construtiva *Sched 7* e a busca local com *3-node exchange*, foi desenvolvido na linguagem C++ e todos os experimentos foram executados em um processador Intel i5-4400 3,1GHz com 16GB RAM. Foram utilizadas dez sementes diferentes na execução do GRASP e foi definido o conjunto $\alpha \in \{0,01; 0,02; 0,03; 0,04; 0,05; 0,06; 0,07; 0,08; 0,09; 0,1\}$ com probabilidades inicialmente iguais para todos os valores de α , atualizadas a cada 50 iterações. Como critério de parada foi definido um tempo de limite de 30 minutos de execução, tempo máximo permitido para que um método de apoio a decisão forneça solução para o RUASP, estipulado pela *German Federal Agency of Technical Relief* (THW), conforme destaca Wex et al. [2014].

Os experimentos foram realizados em dois conjuntos de instâncias distintas. O primeiro conjunto composto de 10 instâncias referentes ao terremoto ocorrido no Japão em 2011, utilizadas no trabalho de Wex et al. [2014]. Essas instâncias variam de tamanho, com $m \in \{10; 20; 30; 40\}$ e $n \in \{10; 20; 30; 40\}$ com $m \leq n$. Utilizando os mesmos conjuntos m e n , o segundo conjunto de instâncias, também contendo 10 instâncias, foi gerado a partir de dados extraídos sobre o desastre ocorrido em 2011 no estado do Rio de Janeiro. O detalhamento da geração do segundo conjunto de instâncias é feito na seção a seguir.

5.1. Geração de dados

A partir de dados coletados sobre o desastre de 2011 no Rio de Janeiro, foram definidos os parâmetros de entrada para geração do segundo conjunto de instâncias propostas nesse trabalho. Foram geradas ao todo 10 instâncias, com $m \in \{10, 20, 30, 40\}$ e $n \in \{10, 20, 30, 40\}$ com $m \leq n$. Os dados divergem daqueles utilizados por Wex et al. [2014], pelo aumento considerável nos tempos despendidos tanto no deslocamento para os locais de ocorrência dos incidentes quanto no tempo de atendimento desses incidentes, dadas a dificuldade de acesso e deslocamento características da região afetada. O método de geração de instâncias se baseou no método utilizado no trabalho sobre o terremoto no Japão [Wex et al., 2014] e os parâmetros de entrada são descritos na Tabela 1. Para a avaliação da elegibilidade, para cada incidente i define-se uma categoria (c_i) como um valor inteiro no intervalo de 1 a 5 e para cada unidade de resgate define-se a capacidade dessa unidade em atender uma determinada categoria. Essa categoria indica as necessidades que um incidente demanda para ser atendido. Dessa forma, a elegibilidade de uma unidade em atender um incidente é verdadeira se a mesma for capaz de atender a categoria desse incidente. Um exemplo de elegibilidade para o caso da região serrana do Rio de Janeiro pode ser visto com relação a incidentes de difícil acesso que necessitem de suporte aéreo, fazendo com que somente um subconjunto de unidades de resgates que possuam helicóptero de resgate sejam capazes de atendê-los.

Tabela 1: Parâmetros de entrada para a geração de instâncias do desastre de 2011 no Rio Janeiro.¹

Parâmetros de entrada	Valor, intervalo das distribuições
Número de unidades de resgate	$m \in \{10; 20; 30; 40\}$
Número de incidentes	$n \in \{10; 20; 30; 40\}$
Tempos de processamento	$p_i^k \sim N(500; 200), i \in N, k \in M$
Tempos de <i>setup</i>	$s_{ij}^k \sim N(135; 55), i \in N, j \in N, k \in M$
Fator de destruição	$w_i \sim U(1; 1; 5), i \in N$
Categoria do incidente	$c_i \sim U(1; 1; 5), i \in N$
Capacidade da unidade de resgate	$A_c^k \sim B(0, 5), c \in C, k \in M$
Conjunto de máquinas elegíveis para cada incidente	$M_i = \{k A_{c_i}^k = 1\}, i \in N, k \in M$

5.2. Resultados e discussão

Os resultados do GRASP reativo, para o primeiro conjunto de instâncias (*Inst*), são demonstrados na Tabela 2 com o número de unidades (m) e de incidentes (n) especificados. São apresentados os resultados obtidos pela aplicação da heurística *Sched 7* em conjunto com a busca local com *3-node exchange* (*Sched 7* + BL), das melhores soluções conhecidas (*Best Known Solutions* - *BKS*) para essas instâncias até então, todas elas oriundas do trabalho original desenvolvido por Wex et al. [2014], e do GRASP reativo subdividido em: Mínimo, Média, Máximo, desvio padrão (DP) e os desvios percentuais, tanto com relação às melhores soluções (ΔBKS) quanto com relação às soluções da heurística com busca local ($\Delta S7$).

Tabela 2: Resultados do GRASP reativo com 30 minutos de execução para as instâncias do terremoto do Japão de 2011.

<i>Inst</i>	m	n	<i>Sched 7</i> + BL	<i>BKS</i>	GRASP Reativo					
				[Wex et al., 2014]	<i>Mínimo</i>	<i>Média</i>	<i>Máximo</i>	<i>DP</i>	ΔBKS	$\Delta S7$
1	10	10	276.67	276.67	269.08	269.08	269.08	0.00	-2.74%	-2.74%
2	10	20	868.03	834.41	821.15	825.70	826.65	2.04	-1.04%	-4.88%
3	10	30	2130.71	2069.54	2022.94	2023.55	2024.97	0.98	-2.22%	-5.03%
4	10	40	2582.09	2471.92	2452.52	2459.88	2464.74	4.36	-0.49%	-4.73%
5	20	20	482.90	481.02	465.80	466.23	466.86	0.54	-3.07%	-3.45%
6	20	30	661.95	645.16	633.06	635.46	637.67	2.08	-1.50%	-4.00%
7	20	40	1098.58	1076.03	1059.58	1068.31	1075.81	4.19	-0.72%	-2.76%
8	30	30	520.79	484.94	477.79	477.88	478.70	0.29	-1.46%	-8.24%
9	30	40	850.55	779.50	789.92	794.37	801.58	3.36	1.91%	-6.60%
10	40	40	822.01	684.10	680.65	687.53	694.36	5.17	0.50%	-16.36%
<i>Média</i>									- 1,08%	-5,88%

Os resultados evidenciaram que o GRASP reativo foi capaz de reduzir o custo em oito (1-8) de 10 instâncias com relação às melhores soluções conhecidas até então para o problema, com um ganho médio de 1,08%, dentre todas as instâncias, chegando a 3,07% na instância 5. Além disso, vale ressaltar que mesmo as soluções máximas obtidas pelo método foram menores do que as BKS para essas mesmas instâncias (1-8). Nas duas instâncias de maior porte (9 e 10) o método não conseguiu melhorar as soluções obtidas por Wex et al. [2014]. No comparativo com a heurística *Sched 7* com busca local, o algoritmo mostrou um ganho ainda maior de 5,88% na média, chegando a 16,36% na instância 10, indicando que as perdas com o uso dessa heurística em um caso prático podem ser consideráveis.

¹Utilizou-se a notação $U(\alpha; \beta; \gamma)$ para definir uma distribuição uniforme discreta entre β e γ com um passo de tamanho α .

Como o problema trata de um caso real de atendimento a incidentes, qualquer solução que possa melhorar a programação das unidades de resgate pode resultar em um atendimento mais eficiente dos incidentes de forma geral, respeitando os diferentes níveis de criticidade e ajudando a evitar maiores tragédias.

A evolução do algoritmo ao longo do tempo pode ser vista no gráfico apresentado na Figura 2. Neste gráfico, são indicados o tempo de execução em segundos no eixo horizontal, com um limite de 1800 segundos (30 minutos) de execução, e o desvio percentual médio com relação a BKS (ΔBKS) no eixo vertical. Dessa forma, a linha de 0% de desvio indica as melhores soluções da literatura (BKS), obtidas por Wex et al. [2014].

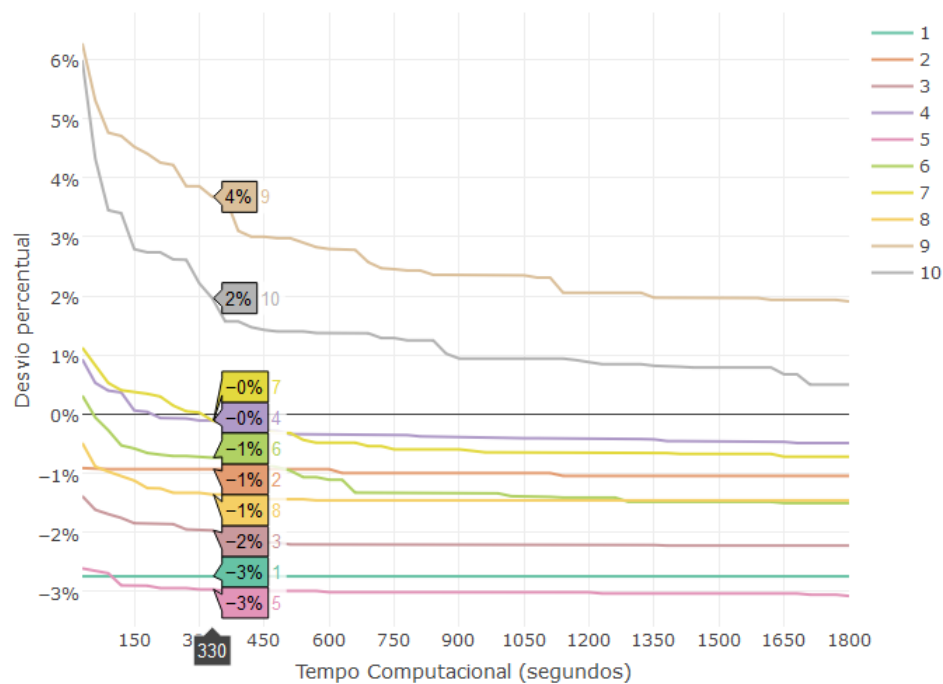


Figura 2: Evolutivo das soluções médias do GRASP reativo por instância.

Pelo gráfico observa-se que com 330 segundos (5 minutos e 30 segundos) as soluções médias para as oito instâncias (1-8), destacadas anteriormente, já ultrapassam as melhores soluções conhecidas na literatura, indicando que não é necessário, para a obtenção de melhores soluções, que o método seja executado até o tempo limite de 30 minutos. Além disso, percebe-se que a partir de aproximadamente 750 segundos (12 minutos e 30 segundos) as soluções médias começam a apresentar um comportamento estacionário com pouco potencial de melhoria. Para as instâncias 9 e 10, o método continuou indicando uma tendência de melhoria das soluções médias conforme o tempo de execução se aproxima do tempo limite de 1800 segundos, contudo, quando a execução do algoritmo foi interrompida as soluções apresentadas não conseguiram aprimorar as melhores soluções da literatura, conforme descrito anteriormente.

Atestando a capacidade do GRASP reativo em prover boas soluções para o RUASP, a partir de instâncias da literatura, o algoritmo foi então aplicado ao segundo conjunto de instâncias (*Inst*), dessa vez referentes ao desastre de 2011 no Rio de Janeiro. Os resultados consolidados, com 30 minutos de execução, são exibidos na Tabela 3 em termos do número de unidades (m), número de incidentes (n), resultados obtidos pela aplicação da heurística *Sched 7* em conjunto com a busca local com *3-node exchange* (*Sched 7* + BL) e dos resultados do GRASP reativo, subdivididos em: Mínimo, Média, Máximo, desvio padrão (DP) e os desvios percentuais com relação às soluções da heurística com busca local ($\Delta S7$).

Tabela 3: Resultados do GRASP reativo com 30 minutos de execução para as instâncias do desastre ocorrido no Rio de Janeiro em 2011.

<i>Inst</i>	<i>m</i>	<i>n</i>	<i>Sched 7 + BL</i>	GRASP Reativo				
				<i>Mínimo</i>	<i>Média</i>	<i>Máximo</i>	<i>DP</i>	$\Delta S7$
1	10	10	10220,2	9911,51	9911,51	9911,51	0,00	-3,02%
2	10	20	27865,8	27050,6	27050,6	27050,6	0,00	-2,93%
3	10	30	54062,6	53328	53328,06	53328,1	0,05	-1,36%
4	10	40	79345,5	77951,6	78191,45	78342	110,26	-1,45%
5	20	20	16941,3	16641	16641	16641	0,00	-1,77%
6	20	30	40330,3	39611,5	39641,66	39762,3	63,58	-1,71%
7	20	40	52350,7	51305,4	51428,48	51568,5	114,70	-1,76%
8	20	30	24979,4	24490,5	24490,5	24490,5	0,00	-1,96%
9	30	40	38759,3	37615,8	37773,38	37976,7	106,58	-2,54%
10	40	40	31229,5	30742,9	30930,08	31051,1	82,11	-0,96%
<i>Média</i>								-1,95%

Para esse conjunto de instâncias, a heurística *Sched 7* apresentou bom desempenho, com um desvio médio de apenas 1,95% em relação ao GRASP e com um desvio máximo de 3,02% para a instância 1. Contudo, conforme destacado anteriormente, apesar de competitivo com o GRASP reativo, qualquer melhoria por menor que seja pode ser muito significativa para o tipo de problema abordado.

Com os resultados do GRASP reativo consolidados é possível que uma avaliação com relação ao parâmetro α seja realizada a fim de atestar se o método de fato utilizou valores diferentes para esse parâmetro e o seu comportamento ao longo dos diferentes portes de instâncias. Dessa forma, o valor de α que gerou a melhor solução para cada instância, dentre os 10 experimentos realizados, em todo o conjunto de instâncias foi armazenado e os resultados podem ser observados na Figura 3.

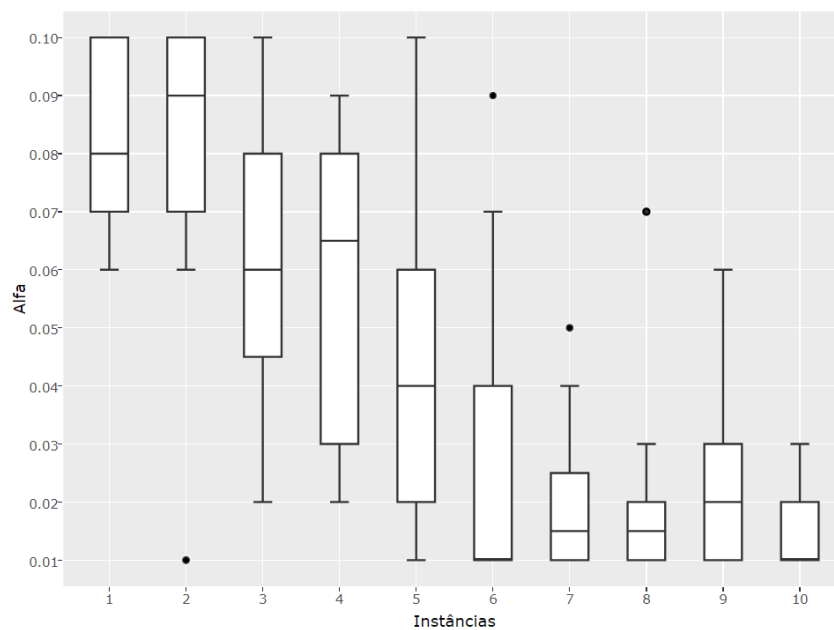


Figura 3: Exemplo do 3-node exchange com três unidades de resgate.

Pela avaliação do gráfico, fica evidente que conforme o porte da instância aumenta, o valor de α que gera a melhor solução diminui. Isso reforça que a característica reativa do método foi capaz de se ajustar aos diferentes portes do problema e que um valor de α médio não seria capaz de prover soluções com a mesma qualidade para todas as instâncias.

6. Considerações finais

Neste trabalho foi abordado o problema de alocação e sequenciamento de unidades de resgate (*Rescue Unit Assignment and Scheduling Problem - RUASP*) para o atendimento de incidentes ocasionados por desastres súbitos, aplicado a dois conjuntos de instâncias distintas, ambas baseadas em casos reais. O primeiro deles referente ao terremoto ocorrido no ano de 2011 no Japão e o segundo, desenvolvido pelos autores, com base em dados do desastre ocorrido no mesmo ano na região serrana do Rio de Janeiro.

Um algoritmo GRASP reativo foi proposto para lidar com o problema, apresentando soluções de custo 1,08% menores em média do que as melhores obtidas na literatura para o problema, no primeiro conjunto de instâncias, chegando a uma redução máxima de 3,07% em uma das instâncias avaliadas desse conjunto. Para as instâncias do caso do Rio de Janeiro, o GRASP reativo foi comparado com a aplicação de métodos heurísticos definidos na literatura como eficientes para o RUASP, tendo um ganho médio de 1,95% chegando a um ganho máximo de 3,02% em uma das instâncias propostas. Em uma análise sobre a componente reativa do método, evidenciou-se que o uso do ajuste automático auxiliou para que o método tivesse uma boa performance em instâncias de diferentes portes.

Para trabalhos futuros, outras heurísticas construtivas e de busca local podem ser implementadas no GRASP reativo, além da possibilidade de que sejam geradas novas instâncias de teste a partir dos dados dos incidentes da região serrana no Rio de Janeiro. Um número maior de testes ajuda a aprimorar o método quanto a resolução do problema, tornando-o mais robusto para lidar com a fase de resposta de um desastre súbito.

Referências

- Altay, N. e Green III, W. G. (2006). OR/MS research in disaster operations management. *European journal of operational research*, 175(1):475–493.
- Banco Mundial (2012). Avaliação de perdas e danos: Inundações e deslizamentos na região serrana do rio de janeiro – janeiro de 2011. <http://documents.worldbank.org/curated/pt/260891468222895493/pdf/NonAsciiFileName0.pdf>. Acessado: 2018-03-26.
- Celik, M., Ergun, O., Johnson, B., Keskinocak, P., Lorca, A., Pekgun, P., e Swann, J. (2012). Humanitarian logistics, tutorials in operations research. In *Institute for Annual Operations Research and the Management Sciences (INFORMS) conference*, p. 14–17.
- da Costa, N. B. O. L., Fontainha, T. C., e Leiras, A. (2017). Brazilian air force operations in disaster response—a process analysis. *Disaster Prevention and Management: An International Journal*, 26(4):479–498.
- Duque, P. M. e Sörensen, K. (2011). A grasp metaheuristic to improve accessibility after a disaster. *OR spectrum*, 33(3):525–542.
- Feo, T. A. e Resende, M. G. (1989). A probabilistic heuristic for a computationally difficult set covering problem. *Operations research letters*, 8(2):67–71.
- Ferrer, J. M., Ortuño, M. T., e Tirado, G. (2016). A grasp metaheuristic for humanitarian aid distribution. *Journal of Heuristics*, 22(1):55–87.

- Galindo, G. e Batta, R. (2013). Review of recent developments in or/ms research in disaster operations management. *European Journal of Operational Research*, 230(2):201–211.
- Gendreau, M. e Potvin, J.-Y. (2010). *Handbook of metaheuristics*, volume 2. Springer.
- Guha-Sapir, D., HOYOIS, P., WALLEMACQ, P., e BELOW, R. (2017). Annual disaster statistical review 2016: The numbers and trends. Technical report, Brussels: Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED).
- Korkou, T., Souravlias, D., Parsopoulos, K., e Skouri, K. (2016). Metaheuristic optimization for logistics in natural disasters. In *International Conference on Dynamics of Disasters*, p. 113–134. Springer.
- Kovács, G. e Spens, K. M. (2007). Humanitarian logistics in disaster relief operations. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 37(2):99–114.
- Leiras, A., de Brito Jr, I., Queiroz Peres, E., Rejane Bertazzo, T., e Tsugunobu Yoshida Yoshizaki, H. (2014). Literature review of humanitarian logistics research: trends and challenges. *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management*, 4(1):95–130.
- Prais, M. e Ribeiro, C. C. (2000). Reactive grasp: An application to a matrix decomposition problem in tdma traffic assignment. *INFORMS Journal on Computing*, 12(3):164–176.
- Sze, J. F., Salhi, S., e Wassan, N. (2017). The cumulative capacitated vehicle routing problem with min-sum and min-max objectives: An effective hybridisation of adaptive variable neighbourhood search and large neighbourhood search. *Transportation Research Part B: Methodological*, 101: 162–184.
- Talarico, L., Meisel, F., e Sörensen, K. (2015). Ambulance routing for disaster response with patient groups. *Computers & Operations Research*, 56:120–133.
- Thomas, A. e Mizushima, M. (2005). Logistics training: necessity or luxury. *Forced Migration Review*, 22(22):60–61.
- Torre, L. E., Dolinskaya, I. S., e Smilowitz, K. R. (2012). Disaster relief routing: Integrating research and practice. *Socio-economic planning sciences*, 46(1):88–97.
- UNISDR (2018). Terminology on disaster risk reduction. <https://www.unisdr.org/we/inform/terminology>. Acessado: 2018-03-26.
- Van Wassenhove, L. N. (2006). Humanitarian aid logistics: supply chain management in high gear. *Journal of the Operational research Society*, 57(5):475–489.
- Wex, F., Schryen, G., Feuerriegel, S., e Neumann, D. (2014). Emergency response in natural disaster management: Allocation and scheduling of rescue units. *European Journal of Operational Research*, 235(3):697–708.
- Xavier, I. R. (2016). Procedimento para planejamento do emprego de helicópteros militares no suporte logístico a desastres naturais. Master's thesis, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.
- Yi, W. e Kumar, A. (2007). Ant colony optimization for disaster relief operations. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 43(6):660 – 672. ISSN 1366-5545. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136655450700021X>. Challenges of Emergency Logistics Management.