



ESCANEAMENTOS 3D DE JOEL, DOS DOZE PROFETAS DE ALEIJADINHO (CONGONHAS DO CAMPO), DISPONIBILIZADOS PELA UNESCO E PELO MUSEU DE CONGONHAS PARA A OBRA DE ALINE XAVIER E HAROON GUNN-SALIE. PROFECIA – DA SÉRIE AGRIDOCE, ESCULTURA, 2017.

MISSÕES DE BUSCA E RESGATE UTILIZANDO DRONES E PLATAFORMAS DE ABASTECIMENTO MÓVEIS

ROBERTO GOMES RIBEIRO*

LUCIANO PERDIGÃO COTA*

THIAGO ANTÔNIO MELO EUZÉBIO*

JAIME ARTURO RAMÍREZ**

FREDERICO GADELHA GUIMARÃES***

RESUMO A atual conjuntura global aponta para um futuro no qual Drones serão essenciais como resposta a desastres. Neste âmbito, um dos desafios tecnológicos é permitir o uso integrado de Drones com plataformas de recarga móveis, aumentando, assim, o tempo de voo em missões de busca e resgate. Trata-se de um problema de otimização de difícil solução por resolvedores convencionais. Por essa razão, desenvolvemos uma abordagem heurística para encontrar boas respostas. Simulamos a metodologia proposta na Mina Córrego do Feijão, em Brumadinho, Minas Gerais, onde houve o rompimento de uma barragem de rejeitos de minério. Os resultados obtidos apontam que a metodologia proposta pode auxiliar operações de busca e resgate, fornecendo uma resposta rápida e, portanto, aumentando as chances de encontrar vítimas.

PALAVRAS-CHAVE missões de busca e resgate; drones; plataformas de recarga móveis.

SEARCH AND RESCUE MISSIONS USING DRONES AND MOBILE CHARGE-DOCKING-STATIONS

ABSTRACT The current global scenario points to a future in which Drones will be essential in response to disasters. In this context, one of the technological challenges is to allow the integrated use of Drones with mobile charging stations, thus increasing flight time in search and rescue missions. It is an optimization problem that is difficult to solve by exact solvers. For this reason, we developed a heuristic approach to find good solutions. We simulated the proposed methodology on the Córrego do Feijão mine plant in Brumadinho (Minas Gerais, Brazil), where an ore tailings dam collapsed. The results obtained show that the proposed methodology can assist search and rescue operations, providing a quick response and, therefore, increasing the chances of finding victims.

KEYWORDS search and rescue missions; UAV; mobile charging stations.

* Instituto Tecnológico Vale (ITV).

** Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

1. Introdução

Sistemas com veículos autônomos, suportados por modelos matemáticos computacionais, podem contribuir em diversas atividades inerentes ao ser humano. Muitas destas atividades consistem em operações de resgates em áreas remotas e/ou de difícil acesso. Convivemos frequentemente com desastres gerados por ações ou omissões humanas, bem como desastres causados por fenômenos naturais. Apesar da *expertise* dos profissionais designados a atuar nas frentes de resgate em áreas de risco e da solidariedade social que se revela mais intensa diante de tais tragédias, muitas operações destinadas a este propósito não são suficientes para preservar, sobretudo, a vida das pessoas impactadas e daquelas que se expõem em prol de socorrer o próximo. Um provável motivo é a não utilização dos mecanismos autônomos mencionados ou a falta de um planejamento adequado na aplicação destes.

Os recentes avanços tecnológicos no âmbito da criação de mecanismos autônomos automatizados sinalizam que, em um futuro próximo, tarefas das mais diversas finalidades serão feitas com a mínima intervenção humana. Nesse contexto, destacamos os Veículos Aéreos Não Tripulados (Drones). Esta tecnologia chama atenção por ser limpa, uma vez que é movida a eletricidade, e de custo relativamente baixo quando comparada a outros tipos de veículos não tripulados. Sua gama de aplicações é tão ampla que trouxe para os dias atuais diversos estudos direcionados ao projeto de Drones autônomos. De modo claro e evidente, tais estudos são movidos exatamente pelas expectativas futuras ligadas a suas potenciais aplicações. Como exemplo, destacamos as iniciativas: *Project Wing* (GOOGLE INC., 2020), *Prime Air* (AMAZON INC., 2020) e *Parcelcopter* (DEUTSCHE POST DHL GROUP, 2020). A saber, são projetos promissores em que os componentes principais são Drones autônomos focados no transporte sustentável, seguro e eficiente de mercadorias.

Outra potencial aplicação é o uso de Drones autônomos nas operações de resgates. São atividades nas quais a finalidade principal é a preservação da vida. Assim, o uso

apropriado deste recente avanço tecnológico como ferramenta de auxílio pode trazer benefícios imensuráveis, oferecendo eficiência e segurança nas tarefas de resgate, bem como na avaliação de locais de difícil ou impossível acesso. Segundo a American Red Cross (2015), quando ocorre um desastre, Drones são capazes de fornecer suporte ao avaliar riscos e mapear a região afetada. Al-Tahir Arthur e Davis (2011) ressaltam que Drones podem ser utilizados para estabelecer estruturas de comunicação temporárias e procurar locais em que as equipes de resgate possam ter mais chances de encontrar vítimas. Segundo Floreano e Wood (2015), Drones são frequentemente associados a aplicações de defesa militar. Os autores ressaltam também que os Drones podem ter um grande impacto em tarefas civis, tais como a mitigação de desastres. Para Chowdhury *et al.* (2017), Drones são subutilizados, apesar de terem potencial para desempenhar um papel importante em todos os estágios de um desastre.

No Brasil, recentes acontecimentos reforçaram o impacto de tragédias originadas das ações humanas ou dos fenômenos naturais. Podemos destacar o rompimento de uma barragem de rejeito de minérios em Brumadinho (MG), em 25 de janeiro de 2019. Este rompimento foi o maior desastre no Brasil em perda de vidas humanas e a segunda maior catástrofe industrial do século. As consequências desta tragédia sinalizam que o país precisa estar mais bem preparado para lidar com tais situações. A atual conjuntura tecnológica global já aponta para um futuro no qual o uso de Drones autônomos será essencial para evitar tragédias ou minimizar seus impactos. No entanto, aplicações para este fim ainda dependem de muitos desdobramentos tecnológicos, principalmente no Brasil, uma vez que a ausência de tecnologias que permitam o uso adequado de Drones em operações de resgate é ainda mais evidente. Ademais, no que diz respeito ao uso de Drones autônomos, existe uma enorme distância em relação aos países que estão no topo do índice de preparo tecnológico e, até mesmo, dos outros grandes países emergentes.

Um dos campos de investigação dentro deste contexto está relacionado ao planejamento adequado das operações envolvendo o número de Drones utilizados e as rotas percorridas por cada um dos veículos. Visto que estes veículos aéreos são, via de regra, movidos a eletricidade e inevitavelmente exigem constantes recargas (Cao *et al.*, 2018), é também necessário incluir no planejamento a definição do número adequado de plataformas de abastecimento e suas localizações geográficas na operação. Trata-se

de um problema de otimização combinatória complexo que tem como finalidade encontrar, para cada operação, uma configuração ótima que busque minimizar o tempo e o custo de operação. Do ponto de vista técnico, o aumento do número de possíveis soluções tem um crescimento exponencial em função do tamanho da área de resgate ou de inspeção. Assim, em aplicações práticas, não é viável analisar todas as possíveis configurações.

Além disso, alguns estudos já apresentam plataformas de recargas revolucionárias que estendem os limites da aplicação de Drones. Trata-se de plataformas compactas e de baixo custo que podem ser facilmente acopladas em veículos terrestres convencionais, como veículos utilitários e caminhões ou, até mesmo, em um futuro próximo, em robôs terrestres autônomos. Tal inovação viabiliza a mobilidade das plataformas de recarga durante uma operação e pode reduzir o tempo de duração da tarefa e/ou o seu custo. No entanto, coloca o problema em um grau de complexidade ainda maior uma vez que é preciso considerar, além do roteamento dos Drones, o roteamento das plataformas e garantir um sincronismo no tempo e no espaço entre estes dois ativos.

Para considerar o uso integrado de Drones com plataformas de abastecimento móveis, novas estratégias de planejamento de operações precisam surgir. Neste contexto, o presente artigo apresenta um modelo matemático/computacional inovador para roteamento de Drones com estações de abastecimento em operações de resgate, no qual é considerado o posicionamento dinâmico das plataformas de recarga. Nos dias atuais, existe um empenho científico global voltado para a solução de desafios similares. Geralmente, os cientistas envolvidos nesta área buscam estender o campo do saber desenvolvendo ou aprimorando modelos complexos e recorrendo a abordagens heurísticas e meta-heurísticas. Na mesma direção, o presente artigo propõe uma estratégia heurística computacional para o roteamento de Drones com plataformas de abastecimento móveis para operações de resgate. Como estudo de caso, o método desenvolvido é aplicado na Mina Córrego do Feijão, em Brumadinho (MG), onde houve o rompimento de uma barragem de minério.

2. Tecnologias

Conforme discutido, Drones autônomos possuem um papel importante em diversas atividades. Sua aplicação pode gerar ganhos significativos em aspectos de segurança e eficiência, especialmente em operações que envolvem risco, tais como as que fazem parte do escopo deste artigo. Além disso, a eficácia de qualquer operação que utiliza Drones depende de um planejamento correto. Isso inclui o uso de estações móveis de carregamento de veículos elétricos, a definição de rotas e o sincronismo entre os ativos envolvidos na operação. Assim, esta seção detalha o que o estado da arte nos apresenta como soluções tecnológicas ligadas ao uso de Drones, sobretudo aquelas que contribuem para êxito de operações de resgate.

2.1. Drones para operações de resgate

Os recentes avanços científicos mostram que Drones com câmeras térmicas podem detectar pessoas, animais e objetos. Esta combinação representa um valioso aparato tecnológico para missões de busca e resgate, particularmente poucas horas após a ocorrência do evento, quando muitas vítimas estão desaparecidas, mas potencialmente vivas. Uma vez associada com tecnologias de voo, segundo Andrea *et al.* (2018), a termografia tornou-se mais frequentemente utilizada em operações de resgate. Para os autores, um dos motivos são suas características não invasivas e poderosas que permitem uma supervisão na faixa de espectro que não é perceptível ao olho humano e nem por câmeras convencionais.

O uso da mencionada tecnologia em diversas operações e, sobretudo, em missões de resgate requer uma organização apropriada das rotas. Tal planejamento depende do desenvolvimento de estratégias matemáticas/computacionais. Babel (2011) apresenta uma abordagem de otimização em redes, baseada na discretização do espaço aéreo não regular, que envolve o uso de Drones. Coutinho *et al.* (2019) propõem uma nova formulação de Programação não linear inteira mista para um problema de roteamento de Drones, em que o objetivo é encontrar simultaneamente as melhores rotas e trajetórias para uma frota de Drones. No mesmo âmbito, Chowdhury *et al.* (2017) apresentam um modelo de aproximação contínua que projeta as potencialidades do uso de Drones como ferramenta de transporte de suprimentos emergenciais em regiões afetadas por

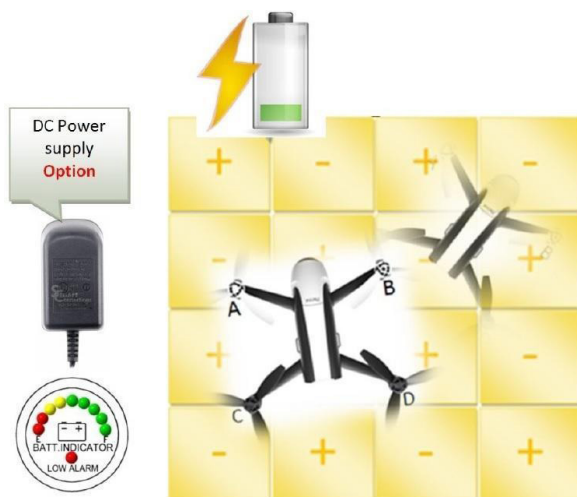
desastres. No mencionado estudo, o objetivo é minimizar o custo total do sistema, determinando as localizações ideais para os centros de distribuição e seus volumes de estoque de suplementos, o qual está sujeito a demandas estocásticas e restrições de roteamento de Drones.

No entanto, por se tratar de um veículo aéreo movido a eletricidade, Drones possuem um alcance de voo limitado e inevitavelmente exigem recargas regulares durante operações em grandes áreas. Em muitas aplicações Drones precisam voar distâncias relativamente longas (LASLA *et al.*, 2019). Em operações de resgate, esta característica dificulta consideravelmente o uso de Drones, especialmente em tarefas que podem durar horas ou, até mesmo, dias. Devido a esta característica, o desenvolvimento de estações de recarga tornou-se um problema de pesquisa emergente. Assim, nos dias atuais, existe um amplo interesse científico focado no desenvolvimento de sistemas eficientes para carregamento de veículos elétricos dos mais diversos tipos. Neste contexto, destacamos a criação de plataformas remotas que são compactas e de baixo custo, projetadas para operações autônomas e contínuas que envolvem o uso de Drones.

2.2. Plataformas de recarga remotas

Hoje existem tecnologias voltadas para recarga de Drones sem ou quase sem intervenção humana. Al-Obaidi *et al.* (2018) apresentam uma estação de carregamento de Drones automática baseada em contato. Tal tecnologia consiste em placas de cobre quadrulares que possuem polaridades negativas e positivas alternadas na forma de um tabuleiro de xadrez, conforme ilustrado na Figura 1. O resultado desta iniciativa é uma plataforma terrestre que garante um contato elétrico quando um Drone pousa. Outra estratégia de carregamento, apresentada por Junaid *et al.* (2017), é um sistema automático de carregamento sem fio de Drones multirotores que utiliza um sistema de detecção de alvo e um mecanismo de rastreamento, no qual o veículo localiza a plataforma e pousa na posição correta. Já Rohan *et al.* (2019) apresentam um sistema de recarga que emprega técnicas de transmissão de energia sem fio e baseadas em acoplamento indutivo por ressonância. Na ocasião, uma estação de carregamento composta por transmissores de energia foi desenvolvida e um receptor foi acoplado no veículo que requer recargas. O resultado é um sistema que dá liberdade para o Drone pousar em qualquer local da plataforma, uma vez que o contato entre o receptor e algum transmissor é garantido.

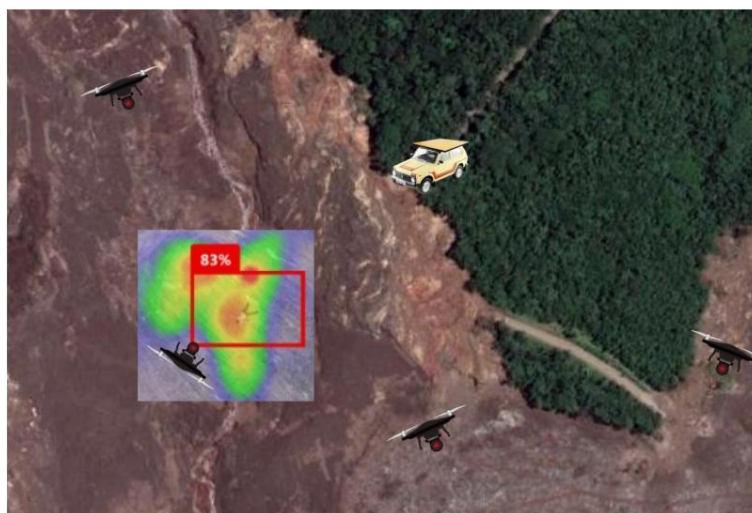
Figura 1 - Componente principal do sistema de carregamento



Fonte: Obaidi *et al.* (2018)

Tendo em vista o desenvolvimento e o aprimoramento constante de sistemas de recarga remotos, diversos estudos, em contextos gerais, consideram o uso de Drones e tais plataformas de forma integrada no planejamento de operações. Geralmente, tais estudos envolvem o roteamento dos Drones e a alocação de plataformas de recarga. Coelho *et al.* (2017) apresentam um problema de roteamento de entrega que considera a autonomia de voo limitada dos veículos e as múltiplas estações de recarga. Já Sundar e Rathinam (2014) lidam com um problema similar, porém composto por um único Drone. O veículo deve cumprir a tarefa de visitar todos os pontos alvos, efetuando recargas durante o trajeto. Para superar a limitação de energia em missões de resgate, Li *et al.* (2018) propõem uma estratégia de planejamento de missão, implantando estações de carregamento estáticas e uma frota de Drones. Os autores formulam o problema de planejamento de missão para cobrir uma determinada área por Drones, incluindo as trajetórias dos veículos e a localização das estações de carregamento. No contexto de mineração, Ribeiro *et al.* (2019) apresentam uma formulação de otimização concisa que envolve o roteamento de Drones e a alocação de estações de recarga fixas para inspeção de um sistema de correias transportadoras. Porém, todos os estudos mencionados acima consideram estações fixas de carregamento em seus modelos matemáticos e métodos computacionais.

Figura 2 - O uso de Drones com plataformas móveis em operações de resgate



Fonte: elaborada pelos autores com base no Google Earth - Coordenadas: Lat. -20.1306°, Lon. -44.1218° (2020)

As características físicas das plataformas de recarga remotas voltadas para Drones, tanto as em desenvolvimento quanto aquelas disponíveis comercialmente, indicam que estas podem ser facilmente acopladas em veículos terrestres. A Figura 2 representa uma abstração de uma possível operação de resgate. No cenário, Drones com câmeras térmicas procuram por vítimas em uma região afetada. Na área em análise, a composição Drone e câmera térmica pode identificar diferenças de temperatura no ambiente. Ainda, com a utilização de técnicas computacionais de reconhecimento de imagens, é possível classificar os objetos encontrados e sinalizar se, de fato, trata-se de uma vítima. No mesmo cenário, um veículo terrestre com uma plataforma de recarga acoplada dá suporte à missão, permitindo que os Drones efetuem recargas e, consequentemente, estendam seus tempos na função de busca. Por se tratar de um veículo móvel, a estação de recarga pode se deslocar para outras regiões afetadas durante uma operação. Esta característica é fundamental e pode reduzir o número de ativos alocados na tarefa, Drones e plataformas de recargas, e/ou seu tempo de duração.

Em missões de busca e resgate, o movimento das plataformas pode ser ainda mais crucial. Um dos fatores está relacionado ao uso eficiente dos recursos disponíveis para executar a tarefa. Em operações com poucos Drones e poucas plataformas de recarga, considerar estações fixas no planejamento pode dificultar ou, até mesmo, inviabilizar a missão. Além disso, tal dinamismo tende a trazer eficiência, aumentando então as

chances de encontrar vítimas, especialmente pessoas vivas e cuja sobrevivência depende de uma resposta rápida.

3. Estratégia De Otimização Proposta

Um planejamento eficiente de operações de busca e resgate que envolva o roteamento de Drones autônomos com posicionamento de estações de recarga, essencialmente, requer o desenvolvimento ou o uso de técnicas apropriadas de otimização. Conforme visto na seção anterior, a tecnologia atual relacionada ao abastecimento de Drones já permite o uso de plataformas móveis. Esta característica torna o problema ainda mais desafiador, uma vez que inclui a necessidade de posicionar as estações de recarga em cada instante de tempo. Trata-se de um problema de otimização combinatória que tem como principal característica a composição de duas redes sincronizadas no tempo e no espaço, conforme descrito na sequência.

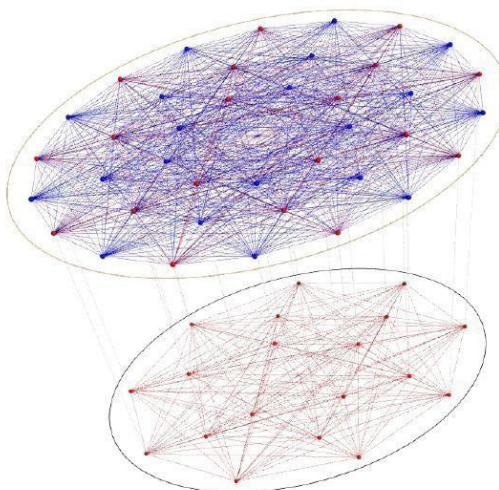
3.1. Redes síncronas para roteamento de Drones com plataformas de recarga móveis

Ao assumir que as plataformas de recargas podem ser movimentadas durante uma operação, é preciso definir uma representação que considere o roteamento deste ativo. Dada esta premissa, considere o conjunto de nós N_1 , no qual cada um dos seus elementos representa um local candidato para posicionar uma plataforma de carregamento móvel em um instante de tempo durante uma operação de busca e resgate. Ainda, seja $G_1 = \{N_1, E_1\}$ uma rede direcionada formada pelo conjunto de nós N_1 e pelo conjunto de arestas E_1 , que são pares ordenados dos elementos que compõem N_1 . Assim, cada aresta do conjunto E_1 é uma variável binária e o arranjo dos seus valores define as rotas percorridas por tais dispositivos de recarga.

Da mesma forma, seja $G_2 = \{N_2, E_2\}$ uma rede direcionada que representa o roteamento dos Drones. Neste caso, o conjunto de nós N_2 é formado por pontos de busca e por possíveis locais de recarga. Ou seja, $N_2 \supset N_1$, o conjunto N_2 contém N_1 . Formado por pares ordenados de N_2 , o conjunto E_2 é formado por arestas, variáveis binárias, que definem as rotas percorridas por Drones.

A composição entre as redes G_1 e G_2 representa o problema de otimização combinatória, para operações de busca e resgate, detalhado no escopo deste artigo. Uma abstração desta composição é ilustrada na Figura 3, na qual os nós vermelhos representam locais candidatos para possíveis recargas e os nós azuis simbolizam locais em que Drones precisam efetuar buscas por vítimas. Ainda, as linhas vermelhas e azuis representam as arestas dos conjuntos E_1 e E_2 , respectivamente. Assim, a rede inferior diz respeito ao movimento das plataformas de recarga, tal como determinado por G_1 , e a rede superior à navegação dos Drones, conforme estabelecido em G_2 .

Figura 3 - Duas redes direcionadas e sincronizadas



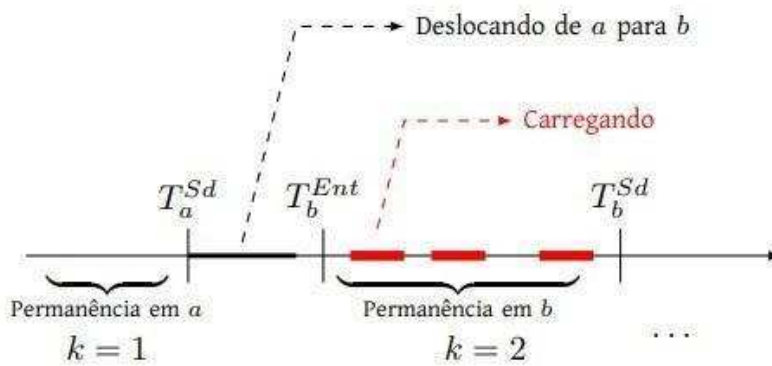
Fonte: elaborada pelos autores (2020)

A rede inferior é formada apenas por locais candidatos para posicionar plataformas de recarga durante a operação, enquanto a rede superior é composta pelos dois tipos de nós. Em termos práticos um Drone pode visitar um nó para efetuar uma busca ou recarregar sua bateria. No entanto, o êxito do processo de recarga depende de um sincronismo no tempo e no espaço entre o Drone e a plataforma que dará suporte a ele. Para ocorrer tal sincronismo, é preciso assegurar que o veículo terrestre esteja no local antes do Drone e permaneça tempo suficiente para concluir o processo de recarga.

A Figura 4 ilustra o dinamismo de uma sincronização entre Drones e uma plataforma de recarga móvel. Seja k um número inteiro que simboliza fatias de tempo, não necessariamente iguais, do tempo total de duração de uma missão de busca e resgate.

Entre os intervalos $k=1$ e $k=2$ uma determinada plataforma de recarga se desloca do nó a para o nó b ($\{a, b\} \in N_1$). Sendo T_b^{Ent} o instante de tempo que tal plataforma chega para prover recargas no local simbolizado por b e T_b^{Sd} o instante de tempo que a mesma plataforma parte deste local para fornecer suporte em outros pontos. Assim, o intervalo de tempo $[T_b^{Ent}, T_b^{Sd}]$ deve ser suficiente para garantir que cada Drone que pouse na plataforma consiga iniciar e concluir seus processos de recarga.

Figura 4 - Sincronização entre Drones e uma plataforma de recarga móvel



Fonte: elaborada pelos autores (2020)

Em suma, o roteamento dos Drones envolvidos na operação deve ser feito de modo a garantir que todos os locais de busca e resgate sejam visitados. Durante a operação, tais veículos aéreos podem realizar recargas de bateria em plataformas de suporte que podem ser deslocadas entre diferentes locais durante a operação. Assim, é fundamental o sincronismo entre estes dois ativos para garantir que estações de carregamento estejam em locais corretos sempre que um Drone precisar recarregar.

3.2. Objetivo e complexidade do problema

No problema em questão, estamos interessados em utilizar da melhor forma possível os recursos disponíveis para uma determinada missão de busca e resgate. Neste ponto, buscamos por soluções que representem o uso eficiente dos ativos disponíveis, Drones e plataformas de recarga móveis, sem influenciar drasticamente na duração da missão. Tal medida diz respeito ao tempo gasto para inspecionar todos os locais de

busca e resgate previamente definidos. Deste modo, é preciso definir no planejamento o número de Drones e de plataformas de recarga móveis envolvidos na operação, bem como as rotas aéreas e terrestres percorridas por cada um deles. Dadas estas considerações, buscamos encontrar a melhor configuração para cada cenário de operação.

Trata-se de um problema complexo que pertence a classe VRP (*Vehicle Routing Problem*) e, portanto, pode ser classificado como NP-difícil (PISINGER, 1995). Tal colocação sinaliza que não existem algoritmos exatos capazes de solucioná-lo em tempo polinomial e, por isso, é preciso recorrer a métodos heurísticos para encontrar boas respostas. Além disso, ao lidar com um problema de roteamento de Drones com plataformas de recarga fixas, Ribeiro *et al.* (2019) constatam que *solvers* exatos não são suficientes para resolver problemas de apelo prático com um grande número de nós. Os autores ainda pontuam que é preciso horas de esforço computacional para solucionar cenários de tamanhos considerados médios. Esta afirmação inviabiliza o uso de *solvers* exatos em problemas práticos, principalmente operações de resgate que exigem uma resposta de planejamento rápida. Dadas estas circunstâncias, recorreremos a abordagens heurísticas e desenvolvemos um método construtivo que permite encontrar uma boa resposta em tempo hábil.

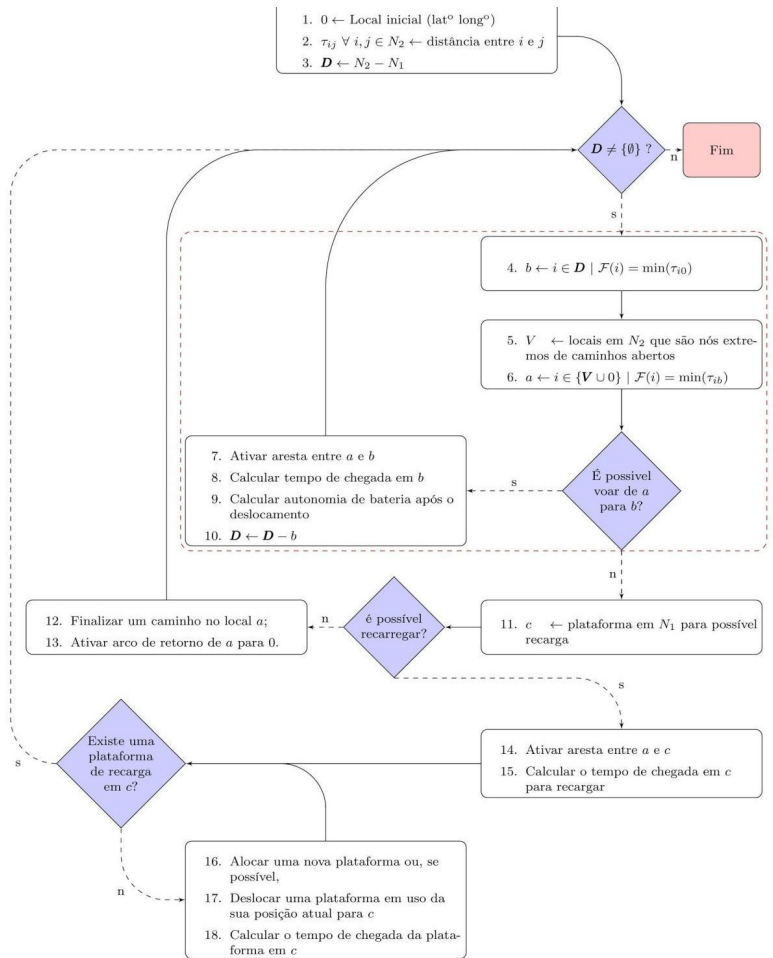
3.3. Método computacional desenvolvido

da o desenvolvimento de um método computacional heurístico. Sucintamente, tal método representa um conjunto de regras que nos conduz a uma boa resposta para o problema em questão. Apesar de não garantir otimalidade, o método desenvolvido tem por finalidade nos apresentar soluções factíveis sem exigir muito tempo de esforço computacional. Esta característica é fundamental para o problema de roteamento em estudo, uma vez que, mesmo em versões com plataformas fixas, garantir a otimalidade pode ser impossível ou demorar dias de execução no computador.

Considerando estas circunstâncias, desenvolvemos um método computacional heurístico que explora peculiaridades do problema e, assim, nos fornece soluções em pouco tempo de esforço computacional. Trata-se de um método construtivo que organiza as rotas e determina o número de Drones de forma iterativa. A cada iteração, na construção de uma solução, novas plataformas móveis de apoio podem ser adicionadas ou plataformas já existentes podem ser deslocadas à medida que surgem demandas de recarga.

A Figura 5 é uma abstração em fluxograma do método computacional desenvolvido. Inicialmente, são identificadas as coordenadas geográficas dos locais de busca e resgate; dos locais candidatos para posicionar plataformas de recarga durante a missão; e do local inicial onde todos os ativos envolvidos na operação devem partir. Definimos o ponto inicial como , conforme etapa 1 do fluxograma. Na etapa 2, calculamos a distância entre todos os pontos (nós) do problema. Implicitamente, a partir da distância, é possível calcular o tempo de deslocamento e o consumo de bateria de um Drone entre dois pontos. Além disso, é possível calcular o tempo que plataformas móveis gastam para serem deslocadas entre dois pontos. A este respeito, assumimos que os veículos terrestres não necessitam de abastecimento durante a missão.

Figura 5 - Abstração em fluxograma do método computacional desenvolvido



Fonte: elaborada pelos autores (2020)

Esta premissa é aceitável dado que tais veículos são movidos a combustíveis fósseis e, conseqüentemente, possuem autonomia de deslocamento maior que o tempo mínimo que se espera de uma operação de busca e resgate.

Na etapa 3, foram selecionados todos os nós que representam locais de busca e resgate. Armazenados no conjunto D , todos estes pontos precisam ser visitados por um Drone uma única vez. Na sequência inicia-se um procedimento iterativo para construir uma solução. Tal procedimento se repete até garantir que todos os nós que, inicialmente, compõem o conjunto D , sejam visitados. Na etapa 4, é selecionado em

D o local de busca e resgate mais próximo do ponto de partida. Denominado como b , este nó representa o destino na iteração corrente. Na etapa 5, é identificada a localização atual de todos os Drones já alocados na operação. Os nós que representam tais localizações formam o conjunto auxiliar V . Assim, a partir de V e do local de partida 0 , é definido o nó origem que precede b . Denominado como a , a origem recebe o nó em $\{0 \cup V\}$ mais próximo de b , conforme definido na etapa 6.

Uma vez definido um ponto de origem e um destino, é preciso verificar se o Drone em a tem autonomia de bateria para voar e realizar a tarefa de busca em b . Se for possível, é incluído no roteamento o trecho entre os pontos a e b . Do ponto de vista da otimização, a aresta que representa o deslocamento entre estes dois pontos é ativada, tal como descrito na etapa 7. Em seguida, o nó b é removido do conjunto e a próxima iteração é executada. Observem que este processo, destacado em vermelho na Figura 4, repete-se até encontrar uma aresta (a, b) que viole a restrição de bateria. Quando isso ocorre, é preciso finalizar o trajeto de um Drone ou forçá-lo a visitar um local de recarga.

Ao verificar que um Drone, localizado em a , não tem autonomia de voo para se deslocar até o ponto b e realizar a tarefa, inicia-se um procedimento de inclusão de plataformas de recargas. Na etapa 11 são verificadas todas as possibilidades e é atribuído ao termo c o ponto que representa a localização mais conveniente para efetuar a recarga. A validação de um local para possível recarga depende essencialmente de dois requisitos. O primeiro determina que a bateria na origem deve ser suficiente para garantir o deslocamento do Drone até o local onde ocorrerá a recarga. No segundo, o sincronismo entre o Drone e a plataforma que fornecerá a recarga precisa ser assegurado, tal como ilustrado na Figura 4.

Se pelo menos um desses requisitos não for atendido, não é possível realizar recargas a partir do local a . Assim, conforme descrito nas etapas 12 e 13, é concluída a rota que um Drone alocado deve percorrer. Sua missão consiste em partir do ponto inicial 0 , visitar todos os nós atribuídos previamente na construção de sua rota e finalizar sua atividade de busca no ponto a . Caso contrário, atendendo aos requisitos mencionados, continua-se o processo de construção de rota, alocando como próximo nó o local de recarga c . Tal procedimento é feito nas etapas 14 e 15 ao ativar a aresta (a, c) e definir o tempo de chegada em c .

Na sequência, é preciso garantir que uma plataforma móvel de recarga esteja no local C no instante de pouso do Drone. Neste estágio, é válido ressaltar que uma possível plataforma alocada em C , nas iterações anteriores, já está sincronizada com o Drone. Assim, a iteração corrente é finalizada. Caso não exista uma plataforma de recarga em C , as etapas 16, 17 e 18 são executadas. Na ocasião, uma plataforma móvel que já esteja em operação é deslocada para este local ou, se necessário, uma nova é alocada. Na primeira situação, é preciso garantir que a plataforma chegue ao local C antes do Drone, viabilizando a recarga. Esta possibilidade é verificada utilizando aspectos tais como as posições geográficas e a velocidade dos veículos terrestres em operação. Além disso, é preciso considerar o instante de tempo mínimo que cada plataforma móvel pode deixar um local sem perder o sincronismo com Drones previamente configurados para nela efetuar recargas. A segunda situação ocorre quando é inviável o deslocamento de qualquer plataforma em operação para o local C . Neste caso, uma nova plataforma móvel é alocada, partindo do local inicial O para o local C .

Na heurística computacional desenvolvida, todo procedimento descrito entre as etapas 4 e 18 consiste em ativar as arestas que farão parte da solução. Tal processo iterativo constrói rotas designadas para Drones até garantir que todos os locais de busca e resgate sejam alcançáveis. Além disso, à medida que surgem demandas por bateria, plataformas de recarga móveis são incluídas e suas rotas definidas sincronicamente com o movimento dos Drones. Ao final, o conjunto de arestas ativas definidas pela heurística computacional nos apresenta um roteamento para a operação. A organização das rotas nos permite definir o número apropriado de ativos, Drones e plataformas de recargas móveis, bem como estimar o tempo de duração de uma missão.

4. Aplicação: mina córrego do feijão, brumadinho (mg)

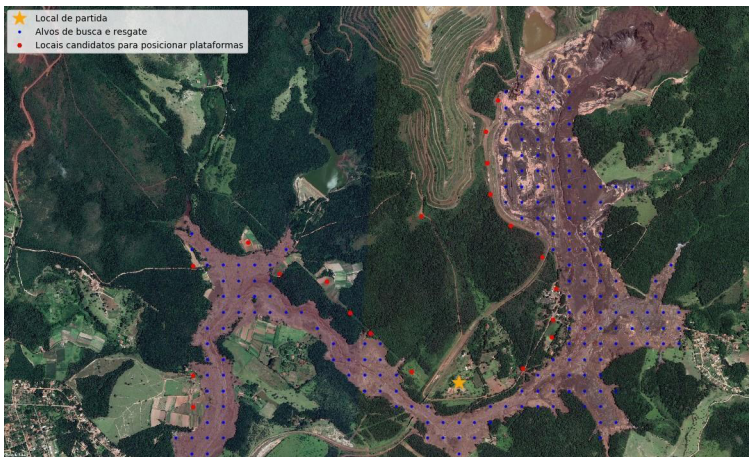
Localizada em Brumadinho (MG), a Mina Córrego do Feijão ficou mundialmente conhecida após o rompimento de uma barragem de rejeitos que vitimou centenas de pessoas, funcionários da mineradora Vale S.A. e moradores do município. Após a tragédia, a mineradora tem procurado por tecnologias e iniciativas que forneçam

Figura 6 -Imagem de satélite na Mina Córrego de Feijão antes do rompimento da barragem de rejeitos



Fonte: elaborada pelos autores com base no Google Earth - Coordenadas: Lat. -20.1306°, Lon. -44.1218° (2020)

Figura 7 -Imagem de satélite na Mina Córrego de Feijão após o rompimento da barragem de rejeitos



Fonte: elaborada pelos autores com base no Google Earth - Coordenadas Lat. -20.1306°, Lon.:-44.1218° (2020)

respostas eficientes para operações de busca e resgate. Uma destas iniciativas foi o acordo firmado com o governo do Estado de Minas Gerais, incluindo a doação de Drones e veículos terrestres 4x4 para uso, inclusive em missões de busca e resgate (VALE S.A., 2020).

Conforme discutido previamente, o uso apropriado destes veículos nas mencionadas missões requer um planejamento que esteja, principalmente, focado na agilidade e na eficiência da operação. Desta forma, aplicamos a metodologia proposta em diferentes cenários da mina afetada com diferentes áreas de busca e locais candidatos para posicionar plataforma de recarga. As Figuras 6 e 7 mostram visões de satélite da região antes e depois da tragédia, respectivamente. Além disso, a Figura 7 mapeia e destaca o posicionamento geográfico dos locais de interesse considerados na metodologia. Em suma, a região afetada foi discretizada em 200 locais de busca e resgate (pontos em azul). Por razões claras, tais locais só podem ser inspecionados por veículos aéreos.

Às margens da região tomada pela lama, indicamos 20 locais acessíveis por veículos terrestres 4x4 com plataformas de recarga que fornecem apoio à operação (pontos em vermelho).

Para validar e simular uma possível aplicação da metodologia proposta, diferentes cenários de busca e resgate na região afetada foram utilizados como objeto de estudo. Nos testes, consideramos o modelo de Drone Inspire I, fabricado pela empresa DJI, equipado com uma câmera térmica. As especificações deste modelo indicam uma

autonomia de voo de 18 minutos e uma velocidade máxima de 22 m/s. O custo atual da combinação Inspire I e câmera térmica é de aproximadamente três mil dólares.

No que diz respeito a plataformas de carregamento, consideramos nos testes uma versão compacta compatível com o modelo de Drone utilizado. Tal plataforma está disponível no mercado ao custo de 649 dólares. Gastos com veículos terrestres não foram incluídos, uma vez que a frota disponível na planta e designada para outras atividades pode ser facilmente alocada na operação. Trata-se de veículos tripulados que trafegam nas vias da região a uma velocidade aproximada de 15 m/s.

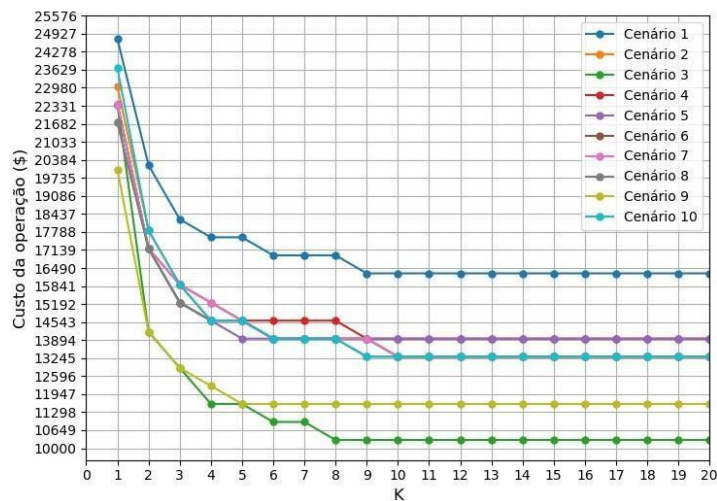
4.1. Resultados obtidos

A metodologia proposta foi aplicada em dez diferentes cenários gerados a partir da planta ilustrada na Figura 7. Em cada cenário, foram definidos aleatoriamente 100 locais de busca e resgate. Em relação aos locais de recarga, foram considerados, em todos os 10 cenários, os 20 locais acessíveis por veículos terrestres apresentados na mesma figura. Além disso, um número limite de movimentos para cada plataforma alocada em uma operação foi estabelecido. Seja K o limite de movimentos. Uma vez que, para cada cenário, existem 20 locais candidatos para posicionar plataformas de recarga, tal limite pode variar de 1 a 20. Para $K=1$, uma plataforma de recarga pode apenas se posicionar em um local e permanece lá até o fim da operação. Em dada circunstância, o problema pode ser interpretado como um roteamento de Drones com plataformas de recarga fixas, tal como definido em Ribeiro *et al.* (2019). Na medida em que aumentamos o valor de K , possibilitamos mais movimentos. No caso extremo, por exemplo, permitimos que uma única plataforma de recarga navegue por todos os 20 locais candidatos.

A heurística foi implementada na linguagem Python e executada em um computador pessoal com processador Intel(R) de 2,50GHz e 8.GB de memória RAM. Com esta configuração computacional, foi possível obter resultados em frações de segundos – premissa fundamental no planejamento de operações que exigem respostas rápidas, tal como a tarefa de busca e resgate que faz parte do escopo deste trabalho. Assim, após a aplicação da heurística desenvolvida em todos os possíveis valores de K , os resultados apresentados na Figura 8 foram obtidos. Para cada cenário, o gráfico mostra o custo de operação em função de K . Conforme é possível observar, o custo de

operação tende a reduzir, até se estabilizar, à medida que permitimos mais movimentos. Os resultados nos mostram que o uso de plataformas móveis no lugar de plataformas fixas, para os cenários testados, reduz em média 41% o custo da operação. Na prática, esta redução significa um melhor uso de ativos, Drones e plataformas de recarga disponíveis, particularidade fundamental em missões com recursos limitados, em que não permitir o movimento das plataformas de recarga pode estender por horas uma operação ou, até mesmo, inviabilizá-la.

Figura 8 - Gráfico Custo de operação em função de K - Resultados obtidos executando a heurística computacional desenvolvida

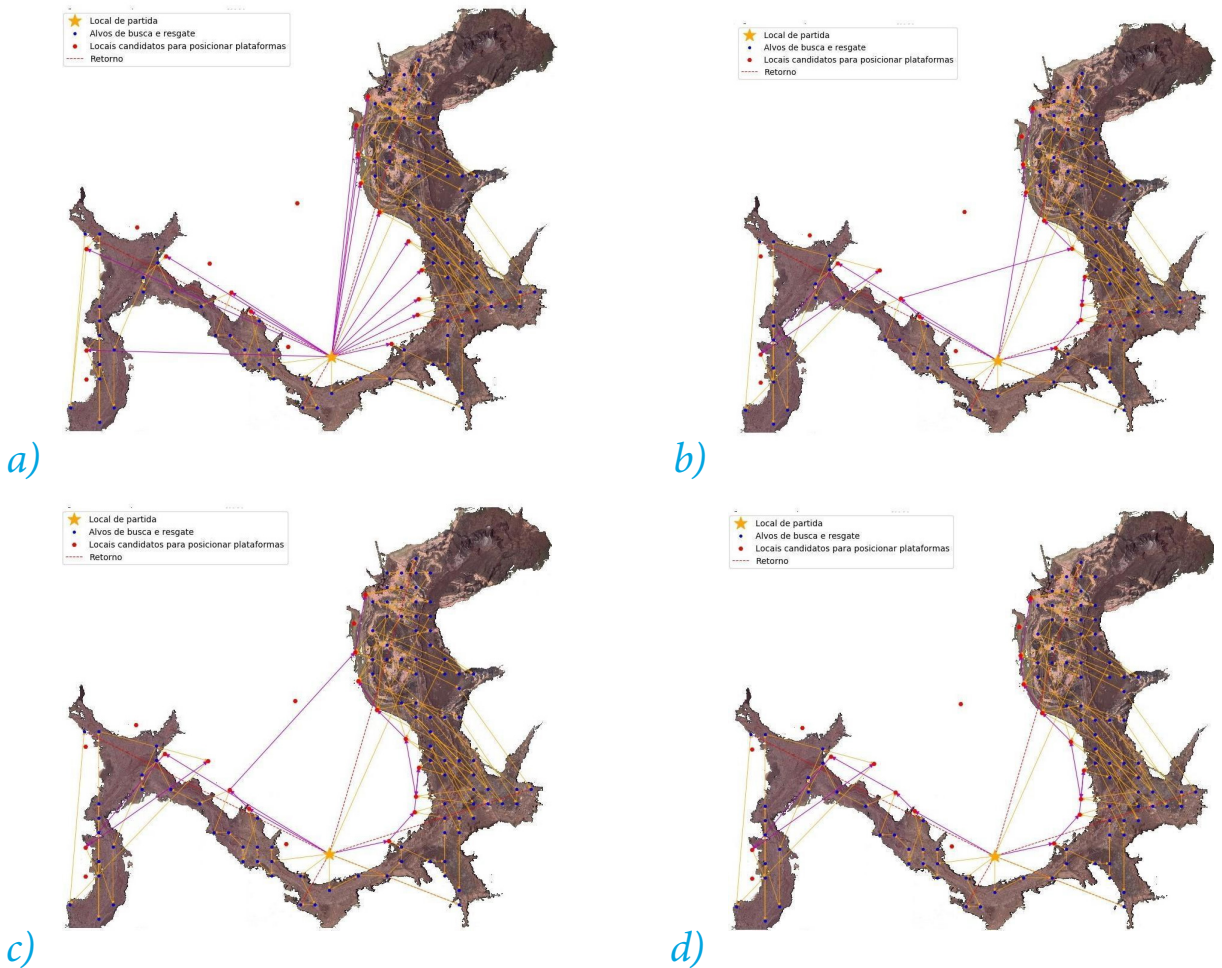


Fonte: elaborada pelos autores (2020)

A metodologia proposta ressalta também o fato de que o uso de Drones em conjunto com plataformas de recarga (veículos 4x4) é uma solução factível tanto do ponto de vista tecnológico quanto financeiro, particularmente em situações de tragédias como a que ocorreu na Mina Córrego do Feijão em Brumadinho (MG). As Figuras 9(a), 9(b), 9(c) e 9(d) mostram resultados obtidos ao executar o cenário 1 com diferentes valores de K . As rotas ilustradas referem-se a possíveis configurações de busca na região afetada. Linhas roxas representam rotas dos veículos terrestres, enquanto linhas amarelas retratam rotas dos Drones. A conjuntura completa em cada figura representa um planejamento para a missão de busca e resgate que nos permite estimar o tempo de operação, bem como o número de ativos alocados. Além disso, indica onde cada Drone e plataforma de resgate devem estar em cada instante de tempo.

A Figura 9(a) apresenta o resultado obtido com $K=1$. Nesta configuração, seriam necessários 5 Drones e 15 veículos 4x4 equipados com plataformas de recarga para garantir o planejamento ótimo apresentado. Em situações práticas, alocar esta quantidade de veículos terrestres exclusivamente na busca e resgate pode não ser uma boa opção, uma vez que, os mesmos veículos podem ser úteis em outras tarefas relacionadas ao desastre. As Figuras 9(b), 9(c) e 9(d) apresentam os resultados obtidos com $K=4$, $K=7$, e $K=10$, respectivamente. Tais resultados mostram soluções que reduzem consideravelmente o número de veículos terrestres alocados na operação sem, praticamente, alterar o roteamento dos Drones.

Figura SEQ Figura * ARABIC 9- Roteamento da operação para o cenário 1 com diferentes valores de K. (a) $K=1$, (b) $K=4$, (c) $K=7$ e (d) $K=10$



Fonte: elaborada pelos autores (2020)

No melhor caso, mostrado na Figura 9(d), por exemplo, seriam necessários apenas dois veículos 4x4 equipados com plataformas de recarga. Considerar este número de veículos terrestres no mesmo cenário, sem permitir a movimentação durante a operação, pode aumentar drasticamente o tempo da missão ou exigir que mais Drones sejam utilizados. Na primeira situação, demandas por recargas podem exigir que Drones tenham que percorrer longas distâncias até os locais em que as plataformas se encontram, aumentando, então, o tamanho das rotas e reduzindo as chances de encontrar vítimas com vidas. Na segunda situação, seria necessário alocar uma quantidade maior de Drones para reduzir a necessidade de recargas.

5. Conclusões E Trabalhos Futuros

O presente artigo apresenta uma estratégia de planejamento inovadora para missões de busca e resgate e que pode ser utilizada momentos após a ocorrência de desastres. A metodologia aborda o uso de Drones autônomos com câmeras térmicas, apropriadas para localizar vítimas, e veículos terrestres adaptados com plataformas de recarga. O emprego de Drones nas mencionadas missões, intrinsecamente, já é uma tecnologia promissora que aumenta consideravelmente a possibilidade de encontrar vítimas com vida. No entanto, por se tratar de veículos aéreos elétricos com baixa autonomia de voo, é essencial utilizar plataformas que permitem recargas durante a tarefa. A partir desta observação, uma abordagem de planejamento que utiliza Drones em conjunto com plataformas de recarga móveis, sincronizados em pontos específicos no tempo e no espaço, foi proposta. Trata-se de um problema de otimização complexo sem solução em tempo polinomial. Assim, o presente trabalho apresenta um método heurístico que oferece soluções de planejamento viáveis para o problema, sem exigir muito tempo de esforço computacional.

Para validar o método heurístico desenvolvido, foram realizados testes utilizando possíveis cenários de busca e resgate na planta operacional da Mina Córrego do Feijão em Brumadinho (MG), onde ocorreu o rompimento de uma barragem de rejeitos de minérios. Os resultados obtidos mostram que o uso de Drones em conjunto com plataformas móveis, orientados por uma estratégia de planejamento apropriada, é uma solução tecnológica atrativa que pode mitigar os danos provocados por um desastre.

O uso eficiente desta combinação de ativos pode viabilizar respostas rápidas para missões de busca e resgate, reduzindo o tempo de operação e, conseqüentemente, aumentando as chances de encontrar vítimas.

A vasta gama de aplicações tecnológicas cujos principais componentes são Drones sugere que a metodologia proposta neste artigo pode ser facilmente adaptada para outros contextos. Como exemplo, destacamos aplicações no meio ambiente, na agropecuária e nas defesas militar e civil. Hoje, Drones são utilizados no plantio de árvores, fornecendo agilidade no processo e contribuindo para o reflorestamento do planeta. Na agropecuária, podem auxiliar tarefas de irrigação, identificando regiões com maior necessidade hídrica. No âmbito das defesas militar e civil, são úteis no monitoramento de fronteiras e na inspeção de locais de risco. Todas estas tarefas, bem como muitas outras que envolvem o uso de Drones, podem ser aprimoradas com um planejamento correto que inclua o uso de plataformas móveis de recarga.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio das agências brasileiras CAPES e CNPq e do Instituto Tecnológico Vale (ITV).

Referências

- AL-OBAIDI, M. R. *et al.* Efficient charging pad for unmanned aerial vehicle based on direct contact. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SMART INSTRUMENTATION, MEASUREMENT AND APPLICATION (ICSIMA), 5., 2018. *Proceedings...* Songkhla, Thailand, 2018. p. 1-5. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/icsima.2018.8688767>. Acesso em: 24 jul. 2020.
- AL-TAHIR, R.; ARTHUR, M.; DAVIS, D. Low cost aerial mapping alternatives for natural disasters in the caribbean. In: FIG WORKING WEEK, BRIDGING THE GAP BETWEEN CULTURES. Marrakech, Morocco, 2011. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/228885503_Low_Cost_Aerial_Mapping_Alternatives_for_Natural_Disasters_in_the_Caribbean. Acesso em: 24 jul. 2020.
- AMAZON INC. Amazon Prime Air. *Amazon Inc.* 2019. Disponível em: <https://www.amazon.com/b?node=8037720011>. Acesso em: 21 maio 2020.
- AMERICAN RED CROSS. Drones for disaster response and relief operations. *American Red Cross*. 2015. Disponível em: <https://www.issuelab.org/resources/21683/21683.pdf>. Acesso em: 24 jul. 2020.
- ANDREA, C. *et al.* Geolocation and counting of people with aerial thermal imaging for rescue purposes. In: DE PAOLIS, L.; BOURDOT, P. (Ed.). *Augmented Reality, Virtual Reality, and Computer Graphics. AVR 2018: Lecture Notes in Computer Science*. Springer, Cham, 2018. p. 171-182. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-319-95270-3_12. Acesso em: 24 jul. 2020.
- BABEL, L. Trajectory planning for unmanned aerial vehicles: a network optimization approach. *Mathematical Methods of Operations Research*, Springer, v. 74, n. 3, p. 343-360, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00186-011-0366-1>. Acesso em: 24 jul. 2020.
- CAO, Y. *et al.* Intelligent transportation systems enabled ict framework for electric vehicle charging in smart city. In: MAHESWARAN, M.; BADIDI, E. (Ed.). *Handbook of smart cities*. Springer, Cham, 2018. p. 311-330. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-319-97271-8_12. Acesso em: 24 jul. 2020.
- CHOWDHURY, S. *et al.* Drones for disaster response and relief operations: a continuous approximation model. *International Journal of Production Economics*, Elsevier, v. 188, p. 167-184, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.03.024>. Acesso em: 24 jul. 2020.
- COELHO, B. N. *et al.* A multi-objective green UAV routing problem. *Computers & Operations Research*, Elsevier, v. 88, p. 306-315, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2017.04.011>. Acesso em: 24 jul. 2020.

COUTINHO, W. P.; FLIEGE, J.; BATTARRA, M. Glider Routing and Trajectory Optimization in disaster assessment. *European Journal of Operational Research*, v. 274, n. 3, p. 1138-1154, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.10.057>. Acesso em: 24 jul. 2020.

DEUTSCHE POST DHL GROUP. DHL Parcelcopter 3.0. *Deutsche Post DHL Group*. 2020. Disponível em: <https://www.dpdhl.com/en/media-relations/specials/dhl-parcelcopter.html>. Acesso em: 21 maio 2020.

GOOGLE INC. Project Wing. *Google Inc.* 2019. Disponível em: <https://x.company/projects/wing/>. Acesso em: 21 maio 2020.

FLOREANO, D.; WOOD, R. J. Science, technology and the future of small autonomous drones. *Int. Journal of Science, Nature*, v. 521, p. 460-466, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nature14542>. Acesso em: 24 jul. 2020.

JUNAID, A. B. *et al.* Autonomous wireless self-charging for multi-rotor unmanned aerial vehicles. *Energies, Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, v. 10, n. 6, p. 803, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en10060803>. Acesso em: 24 jul. 2020.

LASLA, N. H. *et al.* Exploiting land transport to improve the UAVs performances for longer mission coverage in smart cities. In: IEEE VEHICULAR TECHNOLOGY CONFERENCE, VTC-Spring 2019. *Proceedings...* Kuala Lumpur, Malaysia, 2019, p. 1-7. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/VTCspring.2019.8746387>. Acesso em: 24 jul. 2020.

LI, B. *et al.* Planning large-scale search and rescue using team of uavs and charging stations. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SAFETY, SECURITY, AND RESCUE ROBOTICS (SSRR), 2018. *Proceedings...* IEEE, Philadelphia, USA, 2018, p. 188. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/SSRR.2018.8468631>. Acesso em: 24 jul. 2020.

PISINGER, David. *Algorithms for knapsack problems*. 1995. Tese (Doutorado) – University of Copenhagen, København, Dinamarca, 1995. Disponível em: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.16.9780>. Acesso em: 24 jul. 2020.

RIBEIRO, R. G. *et al.* Unmanned aerial vehicle location routing problem with charging stations for belt conveyor inspection system in the mining industry. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, v. 21, n. 10, p. 4186-4195, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TITS.2019.2939094>. Acesso em: 24 jul. 2020.

ROHAN, A. *et al.* Advanced Drone Battery Charging System. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, v. 14, n. 3, p. 1395-1405, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42835-019-00119-8>. Acesso em: 24 jul. 2020.

SUNDAR, K.; RATHINAM, S. Algorithms for routing an unmanned aerial vehicle in the presence of refueling depots. *IEEE Trans. Automation Science and Engineering*, v. 11, n. 1, p. 287-294, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TASE.2013.2279544>. Acesso em: 24 jul. 2020.

VALE S.A. Minas Gerais state government and mining municipalities sign agreements to minimize fiscal impacts. *Vale S.A. s.d.* Disponível em: <http://www.vale.com/brasil/en/aboutvale/news/pages/vale-minas-gerais-state-government-and-mining-municipalities-sign-agreements-to-minimize-fiscal-impacts.aspx>. Acesso em: 21 maio 2020.