LI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional
Limeira–SP, 02 a 06 de setembro de 2019

Roteamento de UAVs com Plataformas de Abastecimento para Inspeção de Correias Transportadoras de Minério

Roberto G. Ribeiro[1], José R.C Júnior[2], Luciano P. Cota[1], Thiago Euzébio[1], Frederico G. Guimarães[3]

[1]Instituto Tecnológico Vale, Ouro Preto, MG, 35400-000, Brasil
[2] VALE S.A, São Luís, MA, 65085-580, Brasil
[3] Dep. de Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 31270-010, Brasil

rogorib@ufmg.br, regivaldo.carvalho@vale.com, luciano.p.cota@itv.org, thiago.euzebio@itv.org, fredericoguimaraes@ufmg.br

RESUMO

Sistemas compostos por VANTs (Veículos Aéreos Não Tripulados) podem contribuir em diversas atividades inerentes ao ser humano. Uma destas atividades consiste na inspeção periódica de correias transportadoras no ambiente de mineração. Um planejamento apropriado dentro deste contexto, em geral, tem como finalidade definir o número de componentes envolvidos na solução, rotas e a utilização de plataformas de abastecimento. Deste modo, este trabalho apresenta uma nova formulação de otimização que envolve o roteamento de VANTs e a alocação de estações de recarga para inspeção de um sistema de correias transportadoras de minério. Trata-se de um modelo de Programação Linear Inteira Mista que tem como objetivo minimizar o custo associado a mencionada atividade. Para validar a formulação proposta, realizamos testes computacionais aplicando-a em um sistema real formado por aproximadamente 120km de correias. Os resultados mostram que a nova formulação satisfaz as exigências do problema, sendo então uma importante contribuição na área.

PALAVRAS CHAVE. Roteamento de VANTs, Alocação de plataformas de abastecimento, Inspeção de correias transportadoras.

Tópicos: PO na indústria

ABSTRACT

Systems composed of UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) are helpful in diverse human activities. One of these activities consists of periodical inspection of belt conveyors into the mining environment. In general, appropriate planning within this context aims to establish the number of components, routing and the use of charging docking stations. Hence, this work presents a new optimization formulation addresses the inspections of an ore belt conveyor system which involves the routing of UAVs and the allocation of charging docking stations. It is a Mixed Integer Linear Programming model which the goal is to minimize the cost associated with the inspection activity. For validating the proposed formulation, we conduct computational tests applying it in a real system formed by approximately 120 km of belt conveyors. The results show that the new formulation satisfies the problem requirements and that it is a significant contribution to the subject matter.

KEYWORDS. UAV routing. Charging docking Station Planning, Belt conveyor inspection.

Paper topics: OR in Industry

https://proceedings.science/p/106871?lang=pt-br

1. Introdução

Na industria de mineração, é fundamental o transporte eficiente do material extraído. Um dos componentes essenciais nesta tarefa são as correias transportadoras de minério, amplamente utilizadas nas usinas de processamento e nos portos. Este mecanismo é responsável pelo transporte de milhões de toneladas de minerais no ambiente em questão. Assim, a ausência de inspeções periódicas e manutenções preventivas podem provocar falhas e, consequentemente, perdas significantes para a companhia.

Fig. 1 mostra um acidente catastrófico no sistema de correias transportadoras de minério de ferro estudado por [Nascimento et al., 2017].



Figura 1: Incêndio no sistema de correias transportadoras (Imagem extraída de [Nascimento et al., 2017]).

Segundo [Nascimento et al., 2017], o acidente foi causado pelo superaquecimento de um dos rolos que formam o sistema de correias transportadoras. Os autores também apontam que este é um problema recorrente na planta de mineração considerada em seu estudo, no qual, danos semelhantes já resultaram em perdas da ordem de milhões e paradas operacionais indesejadas.

Uma maneira coerente de prevenir tais acidentes é através da inspeção periódica dos rolos. Nos dias atuais, o que a tecnologia nos oferece como ferramentas dentro deste contexto nos permite razoavelmente prever desgastes nos rolos através de uma análise acústicas, por vibração ou termal [Jiang e Cao, 2015], [Junbo et al., 2015], [Fedorko et al., 2014]. No entanto, apesar das mencionadas técnicas de predição, existem muitos desafios para garantir uma inspeção segura e eficiente do sistema de correias transportadoras no ambiente de mineração. De acordo com [Nascimento et al., 2017], a dificuldade está na extensão do sistema, que pode ser formada por vários quilômetros, e na existência de áreas remotas.

Felizmente, os avanços tecnológicos abriram a possibilidade de inspecionar correias transportadoras de minério via VANTs (Veículos Aéreos Não Tripulados). Também conhecidos como Drones, esta tecnologia chama atenção por ser limpa e de custo relativamente baixo quando comparada a outros tipos de veículos não tripuláveis. Neste contexto, [Nascimento et al., 2017] apresenta um método inovador de monitoramento em que os componentes principais são VANTs. Os autores mostram que o uso de VANTs pode ser uma forma atrativa, segura e econômica de conduzir uma análise termal de rolos de correias transportadoras no ambiente de mineração.

O desafio atual é encontrar o melhor planejamento de rotas para conduzir a inspeção do sistema de correias transportadoras. Trata-se de um problema de otimização combinatória em que é preciso definir, a princípio, o número apropriado de VANTs e a rota percorrida por cada

https://proceedings.science/p/106871?lang=pt-br

um deles na inspeção. Além disso, devido ao fato dos VANTs serem componentes elétricos que exigem constantes recargas, precisamos incluir no planejamento plataformas de carregamento e como organizar as rotas levando-as em consideração. Em face deste desafio, o presente estudo apresenta uma nova modelagem de otimização para roteamento de VANTs com plataformas de carregamento para inspeção de correias transportadoras no ambiente de mineração.

2. Planejamento de estações de carregamento de veículos elétricos

O futuro iminente pede por soluções de transporte baseadas em veículos elétricos. Tais soluções podem fornecer uma influência significativa nos aspectos econômicos e sustentáveis. De acordo com [Shareef et al., 2016], o uso de veículos elétricos é considerado uma excelente alternativa para transportes terrestres uma vez que reduz significantemente a dependência de petróleo e, consequentemente, as emissões de poluentes. No entanto, ao contrário dos veículos tradicionais movidos a combustíveis fósseis, essa tecnologia promissora tem autonomia de deslocamento limitada e pode exigir recargas regulares [Cao et al., 2018]. Devido a esta característica, o planejamento de estações de recarga de veículos elétricos tornou-se um problema de pesquisa emergente. Assim, nos dias atuais existe um amplo interesse científico para fornecer planejamentos de sistemas eficientes para carregamento de veículos elétricos dos mais diversos tipos.

[Liu et al., 2018] apresentam um método de decisão multicritério para posicionar estações de carregamento de veículos elétricos. Os autores combinam um método denominado *decision-making trial and evaluation laboratory* com a abordagem de otimização multiobjetivo sob incerteza MULTIMOORA *Multi-Objective Optimization by Ratio Analysis* [Brauers e Zavadskas, 2012]. Segundo [Chung e Kwon, 2015], uma das barreiras mais críticas para a adoção generalizada de carros elétricos é a falta de infra-estrutura das estações de recarga. Assim, os autores propõem métodos de otimização multi-período, baseados em modelos de localização de reabastecimento de fluxo, para o planejamento estratégico da estações de carregamento.

No contexto de veículos autônomos, [James, 2018] apresenta um problema logístico de escalonamento do uso de veículos. É proposta uma modelagem de programação não-linear inteira mista que representa a alocação de pedidos, roteamento de veículos e planejamento de estações de carregamento. Devido a complexidade do problema, os autores o dividem em dois estágios, nos quais, alocação e planejamento de estações são separados do roteamento. Apresentando um problema de cidades inteligentes, [Ammous et al., 2018] explora as propriedades Markovianas em um esquema de roteamento para modelar um problema de otimização convexa estocástica. O objetivo é minimizar, em sistemas de Mobilidade sob Demanda que usam sistemas de veículos elétricos, a diferença entre o tempo gasto nas rotas de recarga e o tempo de viagem nas estradas.

3. Roteamento de VANTs

Roteamento de veículos é um problema central em pesquisa operacional aplicada a ciência do transporte que foi apresentado por [Dantzig e Ramser, 1959]. Apesar das pesquisas atuais sinalizarem que VANTs autônomos desempenhará um papel importante em sistemas logísticos inteligentes de transporte, a eficiência de tais sistemas depende do roteamento adequado dos VANTs envolvidos. Neste âmbito, [Braekers et al., 2016] apresentam um revisão do estado da arte relacionado a problemas de roteamento de veículos e destacam contribuições relevantes sobre o tema. [Lahyani et al., 2015] apresenta uma taxonomia abrangente e relevante para a literatura dedicada a uma classe de problemas conhecidos como *Rich Vehicle Routing Problem* - RVRP. Sucintamente,

https://proceedings.science/p/106871?lang=pt-br

trata-se de uma classe de problemas de roteamento de veículos formado por restrições e objetivos complexos. No que diz respeito ao roteamento de VANTs, um exemplo de RVRP, [Coutinho et al., 2018] introduzem uma taxonomia e uma revisão das contribuições recentes sobre o tema.

Com relação a inclusão de estações de carregamento em problemas de roteamento de VANTs, [Coelho et al., 2017] apresentam um problema de roteamento de entrega que considera a autonomia de voo limitada dos veículos e múltiplas estações de recarga. Já [Sundar e Rathinam, 2014] lidam com um problema similar, porém composto por um único VANT, no qual 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 VANTs. Os autores formulam o problema de planejamento de missão para cobrir uma determinada área por VANTs, incluindo as trajetórias dos veículos e a localização das estações de carregamento.

4. Formulação do problema

Esta seção apresenta uma nova modelagem de otimização que envolve roteamento de uma frota homogênea de VANTs, com planejamento de estações de carregamento, direcionada a inspeção de um sistema de correias transportadoras. Diz respeito a um modelo de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) de dois índice em que o objetivo é encontrar uma solução de custo mínimo que assegure a inspeção de todos os locais críticos. Para eliminar a necessidade de restrições de sub-tour, o modelo proposto é caracterizado por soluções radiais, na qual, variáveis de decisão adicionais representam arcos de retorno.

4.1. Conjuntos, parâmetros e variáveis

Definimos e consideramos no modelo os seguintes conjuntos e parâmetros:

- Conjunto:
  - $\boldsymbol{O}$: Garagem (Ponto de partida dos VANTs);
  - $\boldsymbol{C}$: Locais críticos que requerem inspeção;
  - $\boldsymbol{G}$: Locais candidatos para instalar plataformas de carregamento de bateria;
  - $\boldsymbol{H}$: $\boldsymbol{O} \cup \boldsymbol{G}$;
  - $\boldsymbol{S}$: $\boldsymbol{C} \cup \boldsymbol{G}$;
  - $\boldsymbol{V}$: $\boldsymbol{O} \cup \boldsymbol{C} \cup \boldsymbol{G}$.
- Parâmetros:
  - $|\boldsymbol{V}|$: Número total de nós;
  - $|\boldsymbol{C}|$: Número de locais críticos que requerem inspeção;
  - α_{ij}: Custo de viagem a partir do nó i para o nó j, $\forall\, i \in \boldsymbol{V}$, $\forall\, j \in \boldsymbol{S}$;
  - β_i: Custo para inspecionar o local crítico associado ao nó i, $\forall\, i \in \boldsymbol{C}$;
  - α_{j0}: Custo de viagem a partir do nó j para a garagem (Ponto de partida);
  - Ω: Custo de um VANT;

- ϕ_j: Custo de instalação de uma plataforma de carregamento no nó $j, \forall\, j \in \boldsymbol{G}$
- Θ: Autonomia de bateria.

O termo $\boldsymbol{O}$ é um conjunto de único índice cujo valor representa as coordenadas do ponto de partida de todos os VANTs. Já os conjuntos $\boldsymbol{C}$ e $\boldsymbol{G}$ representam os nós relacionados aos locais que precisam ser inspecionados por um VANT e aos locais candidatos para instalar plataformas de recarga, respectivamente. Ainda, os parâmetros descritos acima são informações essenciais relacionadas ao problema, tais como: cardinalidades dos conjuntos e custos. Em relação as variáveis, definimos variáveis de decisão e auxiliares conforme apresentadas a seguir:

- x_{ij}: Variável binária que indica se uma aresta que parte do nó i para o nó j está ativa ($x_{ij} = 1$) ou não ($x_{ij} = 0$) , $\forall\, i \in \boldsymbol{V}, \forall\, j \in \boldsymbol{S}\ i \neq j$;
- y_j: Variável binária que indica se a plataforma de recarga associada ao nó j está ativa ($y_j = 1$) ou não ($y_j = 0$), $\forall\, j \in \boldsymbol{G}$;
- z_j: Variável binária que indica se a área crítica associada ao nó j é a última visitada em uma rota, $\forall\, j \in \boldsymbol{C}$;
- w_j: Variável inteira não-negativa que representa quantas rotas terminam na plataforma de recarga associada ao nó $j, \forall\, j \in \boldsymbol{G}$.
- b_i: Variável contínua não-negativa que representa a autonomia de bateria quando um VANT viaja a partir da área associada ao nó $i, \forall\, i \in \boldsymbol{V}$;
- t_i: Variável inteira não-negativa monotonicamente decrescente em uma rota factível, na qual, o número de arestas percorridas a partir do ponto de partida (0) para o nó i deve ser menor ou igual a diferença ($|\boldsymbol{V}| - t_i$), $\forall\, i \in \boldsymbol{S}$.

Podemos observar que x_{ij} é uma variável de dois índices que representa as arestas ativas em uma solução. Já a variável z_j indica se a região crítica j é a última inspecionada em uma rota radial. Similarmente, w_j indica o número de rotas radiais que terminam na plataforma de abastecimento j. Assumindo que cada roda radial criada é um caminho percorrido por um único VANT, z_j e w_j são úteis para determinar o número de VANTs em uma solução. Assim, tal medida pode ser obtida pela expressão: $\sum_{j \in \boldsymbol{C}} z_j + \sum_{j \in \boldsymbol{G}} w_j$. Em relação as variáveis auxiliares b_j e t_j, a primeira é útil para evitar caminhos em que a autonomia de bateria de um VANT não é suficiente para completar a viagem entre dois pontos, enquanto a segunda tem como finalidade garantir que todos as rotas radiais comecem do ponto inicial.

4.2. Modelo proposto

Estamos interessados em minimizar o custo associado a inspeção de locais críticos em um sistema formado por correias trasportadoras de mineral. Deste modo, temos como função objetivo Eq. (1). O termo de dois índice nesta equação representa o custo de roteamento dos VANTs. Uma vez que a criação de rotas requer arestas de retorno para o estação inicial (0), $(\Omega + \alpha_{j0})$ é o custo da abertura de uma rota radial que termina no nó j. Ou seja, o custo do VANT que percorrerá tal

https://proceedings.science/p/106871?lang=pt-br

rota mais o custo de retorno. Assim, podemos observar que o segundo e o terceiro termo desta mesma equação diz respeito ao custo associado a abertura de rotas. Por fim, o último termo está relacionado ao custo de instalação de plataformas de abastecimento.

$$\text{Min} \sum_{\substack{i \in \boldsymbol{V} \\ i \neq j}} \sum_{j \in \boldsymbol{S}} \alpha_{ij} x_{ij} + \sum_{j \in \boldsymbol{C}} (\Omega + \alpha_{j0}) z_j + \sum_{j \in \boldsymbol{G}} (\Omega + \alpha_{j0}) w_j + \sum_{j \in \boldsymbol{G}} \phi_j y_j \tag{1}$$

A seguir, apresentamos as restrições do modelo proposto:

$$\sum_{\substack{i \in \boldsymbol{V} \\ i \neq j}} x_{ij} = 1, \qquad \forall\, j \in \boldsymbol{C} \tag{2}$$

$$\sum_{k \in \boldsymbol{S}} x_{jk} = 1 - z_j, \qquad \forall\, j \in \boldsymbol{C} \tag{3}$$

$$\sum_{\substack{i \in \boldsymbol{S} \\ i \neq j}} x_{ji} + w_j = \sum_{\substack{i \in \boldsymbol{V} \\ i \neq j}} x_{ij}, \qquad \forall\, j \in \boldsymbol{G} \tag{4}$$

$$\sum_{j \in \boldsymbol{S}} x_{0j} = \sum_{j \in \boldsymbol{C}} z_j + \sum_{j \in \boldsymbol{G}} w_j \tag{5}$$

$$x_{ij} \leq y_j, \qquad \forall\, j \in \boldsymbol{G},\ \forall\, i \in \boldsymbol{V} \tag{6}$$

$$x_{ji} \leq y_j, \qquad \forall\, j \in \boldsymbol{G},\ \forall\, i \in \boldsymbol{S} \tag{7}$$

$$\sum_{\substack{i \in \boldsymbol{V} \\ i \neq j}} \sum_{j \in \boldsymbol{V}} x_{ij} = |\boldsymbol{C}| + \sum_{\substack{i \in \boldsymbol{V} \\ i \neq j}} \sum_{j \in \boldsymbol{G}} x_{ij} \tag{8}$$

$$b_0 = \Theta \tag{9}$$

$$b_j = \Theta y_j, \qquad \forall\, j \in \boldsymbol{G} \tag{10}$$

$$0 \leq b_i \leq \Theta, \qquad \forall\, i \in \boldsymbol{V} \tag{11}$$

$$b_j \leq b_i - (\alpha_{ij} + \beta_j) x_{ij} + \Theta(1 - x_{ij}), \qquad \forall\, i \in \boldsymbol{V},\ \forall\, j \in \boldsymbol{C} \tag{12}$$

$$b_i - \alpha_{ij} x_{ij} + \Theta(1 - x_{ij}) \geq 0, \qquad \forall\, i \in \boldsymbol{V},\ \forall\, j \in \boldsymbol{G} \tag{13}$$

$$b_j - \alpha_{j0} z_j + \Theta(1 - z_j) \geq 0, \qquad \forall\, j \in \boldsymbol{C} \tag{14}$$

$$t_0 = |\boldsymbol{V}| \tag{15}$$

$$0 \leq t_j \leq |\boldsymbol{V}| - 1, \qquad \forall\, i \in \boldsymbol{S} \tag{16}$$

$$t_j \leq t_i - x_{ij} + |\boldsymbol{V}|(1 - x_{ij}), \qquad \forall\, i \in \boldsymbol{V},\ \forall\, j \in \boldsymbol{S} \tag{17}$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \qquad \forall\, i, j \in \boldsymbol{V}\ i \neq j \tag{18}$$

$$y_j \in \{0, 1\}, \qquad \forall\, j \in \boldsymbol{G} \tag{19}$$

$$z_j \in \{0, 1\}, \qquad \forall\, j \in \boldsymbol{C} \tag{20}$$

$$w_j \in \mathbb{N}_0^+, \qquad \forall\, j \in \boldsymbol{G} \tag{21}$$

$$b_j \in \mathbb{R}_0^+, \qquad \forall\, j \in \boldsymbol{V} \tag{22}$$

$$t_j \in \mathbb{N}_0^+, \qquad \forall\, j \in \boldsymbol{V} \tag{23}$$

nas quais, as Equações de Eq. (18) para Eq. (23) representam o tipo das variáveis envolvidas. Já a restrição expressa na Eq. (2) tem como finalidade garantir que todos os locais críticos sejam inspecionados uma única vez. Assim, para todos os nós $j \in \mathbf{C}$, tal restrição assegura que o número de arestas de entrada em cada um destes nós seja igual a 1.

Eq. (3) e Eq. (4) representam o número de arestas de entrada e saída de um nó. Eq. (3) indica que, em cada $j \in \mathbf{C}$, o número de arestas de saída deve ser 1, exceto se o nó j for o fim de uma rota radial. Se esta exceção for o caso, o valor da variável z_j deve ser 1 para balancear tal equação. Em relação a Eq. (4), a diferença entre o número de arestas de entrada e arestas de saída de cada nó $j \in \mathbf{G}$ representa o número de rotas que terminam na plataforma de abastecimento j. Uma vez que as variáveis $z_j \in \mathbf{S}$ e $w_j \in \mathbf{G}$ representam finais de caminhos, o somatório destas duas variáveis resultam no número total de rotas criadas, no qual, deve ser igual ao número de arcos de saída da estação inicial (0). Tal condição é estabelecida por Eq. (5).

Em Eq. (8), o termo à esquerda denota o número total de arestas. Para assegurar que todos os nós estejam conectados, o número de arestas ativas em uma solução sem plataformas de abastecimento deve ser igual a cardinalidade de $\mathbf{C}$. Porém, a inclusão de tais plataformas resulta na inclusão de arestas de entrada extras nos nós $j \in \boldsymbol{G}$, tal como expressa no termo à direita de Eq. (8). Em relação a Eq. (15), Eq. (16) e Eq. (17), tais equações são cruciais para evitar ciclos, assegurando soluções radiais. A lógica deste comportamento é apresentada na proposição 1:

Proposição 1 *Seja* $\{x_{j(j-1)}, x_{(j-1)(j-2)}, \ldots, x_{(j-2)(j-k)}\}$ *uma rota de uma solução factível. Então,* $\{t_j, t_{j-1}, t_{j-2}, \ldots, t_{j-k}\}$ *é uma sequência monotonicamente decrescente em que* $t_j > t_{j-1} >, \ldots, > t_{j-k}$*. Como resultado, não existe arestas de saída do nó* $(j-k)$ *que são arestas de entrada em qualquer nó anterior da mesma sequência.*

Considerando a proposição 1, Eq. (15) define que o valor de t_0 de acordo com o número total de nós e Eq. (15) indica que $t_j,\ \forall j \in \boldsymbol{S}$ possui um valor entre 0 and $|\boldsymbol{V}| - 1$. Assim, tal preposição é expressa por Eq. (17). O motivo é o fato de que, assumindo que a aresta x_{ij} esteja ativa ($x_{ij} = 1$), $t_j < t_i$. Como consequência, o valor desta variável inteira associada a qualquer nó posterior conectado na mesma rota também, necessariamente, deve ser menor que t_i. Além disso, a autonomia de bateria de cada VANT envolvido deve ser suficiente para completar uma viagem entre dois pontos e inspecionar o local de destino, quando for o caso. Esta propriedade é garantida pelas equações de Eq. (9) a Eq. (14) e retratada na Proposição 2.

Proposição 2 *Uma aresta* $x_{ij}, i \in \boldsymbol{V}$ *e* $j \in \boldsymbol{C}$*, pode estar ativa se e somente se a diferença* $b_i - (a_{ij} - \beta_j)$ *for maior que* b_j*. Ainda, uma aresta* $x_{ij}, i \in \boldsymbol{V}$ *e* $j \in \boldsymbol{G}$*, pode estar ativa se e somente se a diferença* $b_i - a_{ij}$ *for maior que* 0*. Por fim, um nó* $i \in \boldsymbol{C}$ *só podem ser o último nó visitado em uma rota radial se e somente se a diferença* $b_i - a_{i0}$ *for maior que* 0*.*

Na ocasião, Eq. (9) e Eq. (10) indicam a autonomia de bateria quando um VANT deixa a estação inicial (0) e uma plataforma de abastecimento, respectivamente. Já Eq. (11) representa os limites de bateria quando um VANT deixa qualquer nó. Ainda, Eq. (12) assegura que uma aresta

https://proceedings.science/p/106871?lang=pt-br

x_{ij}, $\forall\, i \in \boldsymbol{V}$ e $\forall\, j \in \boldsymbol{C}$, só pode estar ativa se o consumo associado a viajar do nó i para o nó j mais o consumo associado a inspeção do nó destino for menor que a autonomia de bateria em i. Similarmente, Eq. (13) sinaliza que uma aresta de saída de qualquer nó $i\ \forall\, i \in \boldsymbol{V}$ pode ser uma aresta de entrada em qualquer nó que representa uma plataforma de abastecimento, $j\ \forall\, j \in \boldsymbol{G}$, apenas se a autonomia de bateria for suficiente para completar a viagem entre os dois pontos. Por fim, Eq. (14) estabelece que um nó $i\ \forall\, i \in \boldsymbol{C}$ só pode ser o último ponto visitado em uma rota se a autonomia de bateria neste ponto for suficiente para completar o retorno para a base inicial (0).

4.3. Complexidade do modelo proposto

A complexidade do modelo proposto é apresentada em função do número de locais críticos e locais de inspeção. Em relação ao crescimento do conjunto de variáveis, enfatizamos que o número de variáveis x_{ij}, y_j, z_j, w_j, b_j e t_i são, respectivamente, $(|\boldsymbol{V}| \times \boldsymbol{S} - \boldsymbol{S})$, $\boldsymbol{G}$, $\boldsymbol{C}$, $\boldsymbol{G}$, $\boldsymbol{V}$ e $\boldsymbol{S}$. Então, Eq. (24) representa o crescimento do número de variáveis em função de $|\boldsymbol{C}|$ e $|\boldsymbol{G}|$:

$$(|\boldsymbol{G}| + |\boldsymbol{C}|)^2 + 4|\boldsymbol{G}| + 3|\boldsymbol{C}| + 1 \tag{24}$$

Já em relação a complexidade do conjunto de restrições, consideramos as equações de Eq. (2) até Eq. (18) e também a descrevemos em função de $|C|$ and $|G|$, tal como Eq. (25):

$$4|\boldsymbol{G}|^2 + 2|\boldsymbol{C}|^2 + 6|\boldsymbol{G}||\boldsymbol{C}| + 7(|\boldsymbol{G}| + |\boldsymbol{C}|) + 5 \tag{25}$$

5. Estudo fundamentado em um sistema real de correias transportadoras

Para validar a formulação proposta, realizamos um estudo fundamentado em um sistema real de correias transportadoras. No que diz respeito, consideramos o Terminal Marítimo de Ponta Madeira. Trata-se de um dos mais significantes terminais de carregamento de ferro e manganês do mundo. Localizado em São Luís do Maranhão-MA, Brasil, este terminal é composto por aproximadamente 120 km de correias transportadoras e, segundo [Carvalho Júnior, 2018], falhas nas correias são responsáveis por algo em torno de $325,5$ horas de paradas indesejadas.

Fig. 2 apresenta uma visão por satélite do Terminal Marítimo de Ponta Madeira com demarcações que representam informações de interesse para o problema em estudo. Conforme é possível observar, a planta ilustrada e formada por dois pátios operacionais, nos quais, os componentes principais são correias transportadoras de minério. O sistema é composto por 230 pontos críticos e, claramente, o ideal é que ocorra a inspeção de todos eles. No entanto, para testar a formulação proposta neste estudo, bem como seus limites, selecionamos aleatoriamente subconjuntos de pontos críticos. Por exemplo, na mesma figura estão destacados os pontos críticos selecionados, em que, na totalidade representam 10% do sistema. Além disso, a figura ilustra locais candidatos para instalação de plataformas de abastecimento escolhidos de forma aleatória.

Neste estudo, consideramos os modelos de VANTs *Phantom 3 PRO* e *Inspire I*. Tais modelos foram previamente testados no terminal Marítimo de Ponta Madeira. Fig. 3 e Fig. 4 mostram, respectivamente, um *Phanom 3 PRO* coletando imagens um ponto crítico e um *Inspire I* preparado para decolar. Em relação ao *Phantom 3 PRO*, trata-se de um VANT com capacidade de voo de 23min, velocidade de $16m/s$ e custo de aproximadamente $\$1200$. Já o *Inspire I* possui um tempo de voo

https://proceedings.science/p/106871?lang=pt-br

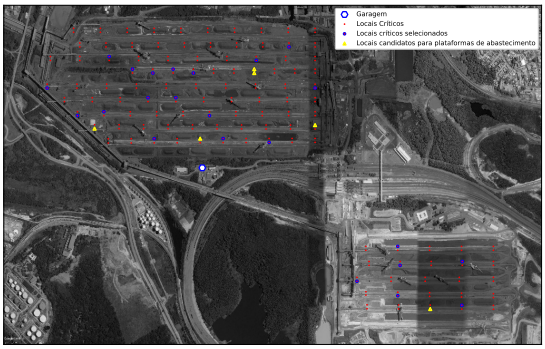


Figura 2: Visão por satélite do Terminal marítimo de Ponta Madeira (Imagem extraída de *Google Earth* - Coordenadas: Lat=-2.568125, Lon=-44.352410).

de 18 minutos, velocidade de $22m/s$ e o seu custo é em torno de $\$2000$. Considerando as duas primeiras características mencionadas, definimos autonomias de baterias de 17664 e 19008 para os modelos *Phantom 3 PRO* e *Inspire I*, respectivamente. Tais valores representam 80% da distância que cada VANT pode percorrer com suas baterias totalmente carregadas.



Figura 3: *Phantom 3 PRO* [Carvalho Júnior, 2018].



Figura 4: *Inspire I* [Carvalho Júnior, 2018].

Similarmente, determinamos o custo de inspeção de cada local crítico a partir do tempo gasto por cada modelo de VANT nesta tarefa. De acordo com observações prévias, o tempo médio que um *Phantom 3 PRO* gasta para inspecionar um local crítico é de aproximadamente 1 minuto, enquanto um *Inspire I* leva em média aproximadamente 35 segundos. Dada estas observações, definimos o custo de inspeção de 1920 e 1540 para os modelos *Phantom 3 PRO* e *Inspire I*, respectivamente. Por fim, no que diz respeito as plataformas de abastecimento, assumimos um custo de instalação de $\$1000$ para os dois modelos de VANT.

6. Resultados computacionais

Para validar a modelo de otimização proposto e testar seus limites, realizamos testes computacionais em instâncias que retratam parcialmente o problema. Consideramos instâncias que representam 5%, 10% e 20% dos 230 pontos críticos do Terminal Marítimo de Ponta Madeira. Além disso, definimos o número de locais candidatos para instalação de plataformas de abastecimento de acordo com o tamanho de cada instância. E, solucionando as mesmas no solver Gurobi 6.51, com limite de tempo de 3 horas, em um servidor Intel Xeon E5-2670 2.3GHz com 16Gb de RAM, obtemos os resultados ilustrados nas figuras de Fig. 5 a Fig. 10. Conforme é possível observar, as instâncias de 5%, 10% e 20% foram executadas considerando os dois modelos de VANTs

https://proceedings.science/p/106871?lang=pt-br

apresentados.

Para instâncias de 10% e 20%, não foi possível obter o ótimo global dentro do limite de tempo computacional estabelecido. Nestes casos, apresentamos os GAPs quantificados utilizando o Solver Gurobi Optimizer. Claramente, a impossibilidade de obter tais resultados está relacionada ao crescimento da cardinalidade do espaço de soluções do problema de roteamento, no qual, é caracterizado por ter complexidade exponencial mesmo sem considerar plataformas de abastecimento. Ainda assim, os resultados confirmam que formulação proposta, sobretudo o conjunto de restrições, atende as propriedades do problema em estudo.

7. Conclusão e trabalhos futuros

Tendo em vista o futuro promissor que soluções baseadas em VANTs pode propiciar, este trabalho apresentou uma nova modelagem que envolve o roteamento deste componente tecnológico para inspeção de correias transportadoras no ambiente de mineração. Devido a necessidade de constantes recargas, a modelagem também inclui o planejamento de plataformas de

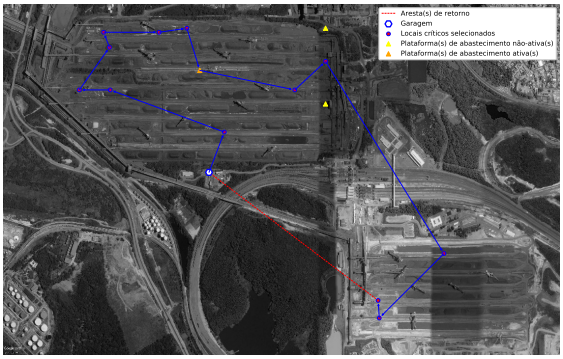


Figura 5: Instância de 5% com *Phantom 3 PRO*- Ótimo global $f(x^*) = 8.13$ encontrado em 15s

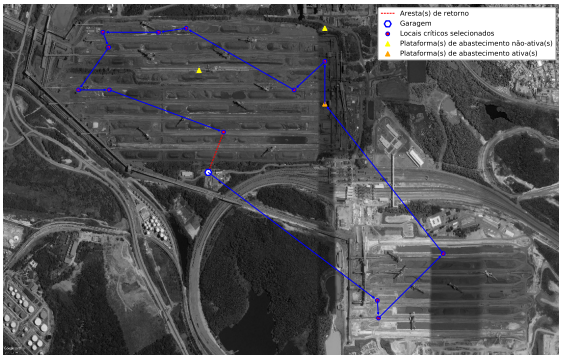


Figura 6: Instância de 5% com *Inspire I* - Ótimo global $f(x^*) = 8.88$ - encontrado em 4.92min

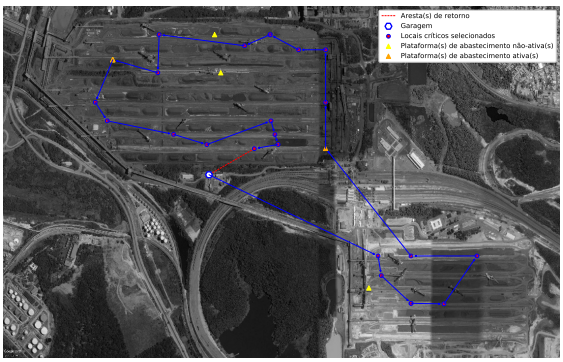


Figura 7: Instância de 10% com *Phantom 3 PRO* - Melhor solução $f(x) = 10.0$ - Tempo limite atingido - GAP de 23.04%

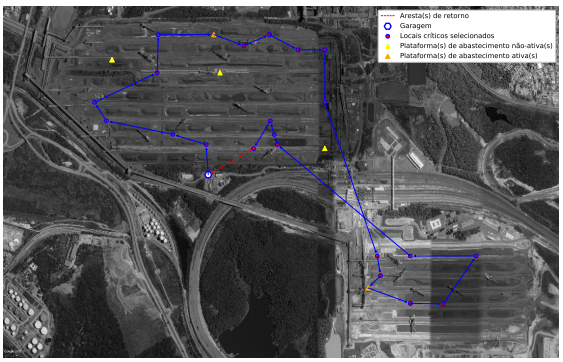


Figura 8: Instância de 10% com *Inspire I* - Melhor solução $f(x) = 10.5$ - Tempo limite atingido - GAP de 44.36%

https://proceedings.science/p/106871?lang=pt-br

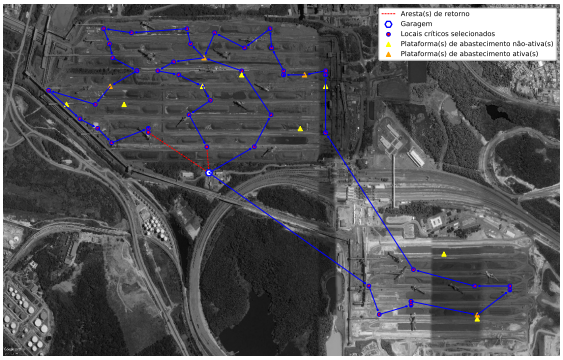


Figura 9: Instância de 20% com *Phantom 3 PRO* - Melhor solução $f(x) = 16.0$ - Tempo limite atingido - GAP de 50.45%

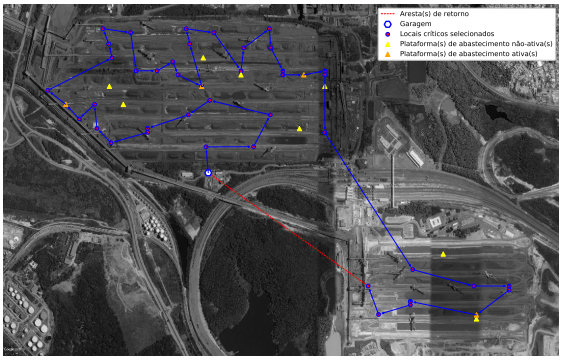


Figura 10: Instância de 20% com *Inspire I* - Melhor solução $f(x) = 14.9$ - Tempo limite atingido - GAP de 50.94%

abastecimento. Ademais, é caracterizada por soluções radiais e possui complexidade quadrática, tanto no crescimento do número de variáveis quanto no conjunto de restrições. Como resultado, temos uma formulação matemática concisa para o problema que combina roteamento de VANTs com alocação de plataformas de abastecimento.

Os testes computacionais realizados nos mostraram que o modelo satisfaz as características do problema em estudo. No entanto, devido a sua complexidade, encontrar o ótimo global em instâncias maiores exige um alto custo computacional. Esta situação requer a investigação de novas abordagens, tais como, aplicação de Solvers que utilizam processamento paralelo, clusterização de pontos de inspeção em instâncias menores que permitam solução exata em tempo hábil e o desenvolvimento de métodos heurísticos. Assim, como trabalhos futuros sugerimos a investigação e elaboração das mencionadas abordagens, principalmente métodos heurísticos, de modo que seja possível solucionar instâncias maiores. Neste caso, a formulação proposta servirá como base para o desenvolvimento de novas estratégias e para validar as soluções obtidas.

Agradecimentos

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

Referências

Ammous, M., Belakaria, S., Sorour, S., e Abdel-Rahim, A. (2018). Optimal cloud-based routing with in-route charging of mobility-on-demand electric vehicles. *IEEE Trans. on Intelligent. Transp. Sys.*

Braekers, K., Ramaekers, K., e Van Nieuwenhuyse, I. (2016). The vehicle routing problem: State of the art classification and review. *Computers & Industrial Engineering*, 99:300–313.

Brauers, W. K. M. e Zavadskas, E. K. (2012). Robustness of multimoora: a method for multi-objective optimization. *Informatica*, 23(1):1–25.

Cao, Y., Ahmad, N., Kaiwartya, O., Puturs, G., e Khalid, M. (2018). Intelligent transportation systems enabled ict framework for electric vehicle charging in smart city. In *HBk of Smart Cities*, p. 311–330. Springer.

https://proceedings.science/p/106871?lang=pt-br

Carvalho Júnior, J. R. d. (2018). Processamento digital de imagens para a identificação automática de falhas em rolos dos transportadores de correias. Master's thesis, Uni. Federal de Ouro Preto.

Chung, S. H. e Kwon, C. (2015). Multi-period planning for electric car charging station locations: A case of korean expressways. *European Journal of Operational Research*, 242(2):677–687.

Coelho, B. N., Coelho, V. N., Coelho, I. M., Ochi, L. S., Zuidema, D., Lima, M. S., da Costa, A. R., et al. (2017). A multi-objective green uav routing problem. *Comp. & Oper. Research*, 88:306–315.

Coutinho, W. P., Battarra, M., e Fliege, J. (2018). The unmanned aerial vehicle routing and trajectory optimisation problem, a taxonomic review. *Computers & Industrial Engineering*, 120:116–128.

Dantzig, G. B. e Ramser, J. H. (1959). The truck dispatching problem. *Management Sci.*, 6(1):80–91.

Fedorko, G., Molnar, V., Dovica, M., Toth, T., e Kopas, M. (2014). Analysis of pipe conveyor belt damaged by thermal wear. *Engineering Failure Analysis*, 45:41–48.

James, J. (2018). Two-stage request scheduling for autonomous vehicle logistic system. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, (99):1–13.

Jiang, X.-p. e Cao, G.-q. (2015). Belt conveyor roller fault audio detection based on the wavelet neural network. In *Natural Computation (ICNC), 2015 11th International Conf. on*, p. 954–958. IEEE.

Junbo, T., Weining, L., Juneng, A., e Xueqian, W. (2015). Fault diagnosis method study in roller bearing based on wavelet transform and stacked auto-encoder. In *Control and Decision Conference (CCDC), 2015 27th Chinese*, p. 4608–4613. IEEE.

Lahyani, R., Khemakhem, M., e Semet, F. (2015). Rich vehicle routing problems: From a taxonomy to a definition. *European Journal of Operational Research*, 241(1):1–14.

Li, B., Patankar, S., Moridian, B., e Mahmoudian, N. (2018). Planning large-scale search and rescue using team of uavs and charging stations. In *2018 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)*, p. 1–8. IEEE.

Liu, H.-C., Yang, M., Zhou, M., e Tian, G. (2018). An integrated multi-criteria decision making approach to location planning of electric vehicle charging stations. *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Sys.*

Nascimento, R., Carvalho, R., Delabrida, S., Bianchi, A. G., Oliveira, R. A. R., e Garcia, L. G. U. (2017). An integrated inspection system for belt conveyor rollers. In *Enterprise Information Systems (ICEIS), 2017 19th International Conference on*, volume 2, p. 190–200.

Shareef, H., Islam, M. M., e Mohamed, A. (2016). A review of the stage-of-the-art charging technologies, placement methodologies, and impacts of electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64:403–420.

Sundar, K. e Rathinam, S. (2014). Algorithms for routing an unmanned aerial vehicle in the presence of refueling depots. *IEEE Trans. Automation Science and Engineering*, 11(1):287–294.

https://proceedings.science/p/106871?lang=pt-br