

Otimização da programação de frota de caminhões de mina minimizando custos de manutenção

Victor Ruela

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Minas Gerais

victorspruela@ufmg.br

21 de outubro de 2020

Agenda

- 1 Introdução
- 2 Metodologia
 - Formulação do Problema
 - Geração das instâncias
 - Método de solução
 - Desenho do experimento
- 3 Resultados
 - Pequena
 - Média
 - Grande
 - Artigo
- 4 Conclusão

Motivação

- O custo de equipamentos para operação de uma mina gira em torno de centenas de milhões de dólares
- Um investimento deste tamanho necessita que eles sejam utilizados da melhor forma ao longo do tempo, de forma que os custos de operação sejam minimizados e a sua utilização maximizada
- A manutenção da frota de caminhões de transporte é um dos maiores custos envolvidos, podendo atingir 100 milhões de dólares anualmente
- Logo, o uso de modelos de otimização para encontrar a melhor utilização da frota que minimize os custos de manutenção possui grande potencial de redução nos custos da operação

Objetivo

- Implementar o modelo de otimização da programação de frota de caminhões em minas de céu aberto através da minimização do custo da manutenção presente na literatura proposto em [Topal, 2010]

Definições preliminares

Índices

t	Identificador do caminhão
b	Faixas de idade
y	Período de tempo (anos)
c	Faixa de operação crítica

Variáveis de decisão

$X_{t,b,y}$	Número de horas alocadas para o caminhão t , faixa de idade b no y -ésimo período de tempo
$Y_{t,b,y}$	1, se o caminhão t na faixa b utilizou todas as horas disponíveis no período de tempo y

Parâmetros

$C_{t,b,y}$	Custo de manutenção (\$/hora) para um caminhão t na faixa b no y -ésimo período de tempo
FE_t	Custo de reparo do motor do caminhão t
$A_{t,y}$	Horas disponíveis do caminhão t no período de tempo y
M	Tamanho da faixa de idade (horas)
R_y	Total de horas de operação para um período de tempo y
I_t	Idade inicial dos caminhão t

Formulação

Minimizar

$$\sum_{y \in Y} \sum_{t \in T} \sum_{b \in B} X_{t,b,y} C_{t,b,y} + \sum_{y \in Y} \sum_{t \in T} Y_{t,c,y} FE_t \quad (1)$$

Formulação

Sujeito a

$$\sum_{b \in B} X_{t,b,y} \leq A_{t,y}, \quad \forall t \in T, \forall y \in Y \quad (2)$$

$$\sum_{y \in Y} X_{t,b,y} \leq M, \quad \forall t \in T, \forall b \in B \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^y X_{t,b,y} \geq MY_{t,b,y}, \quad \forall t \in T, \forall b \in B, \forall y \in Y \quad (4)$$

$$X_{t,(b+1),y} \geq M \sum_{k=1}^y Y_{t,b,k}, \quad \forall t \in T, \forall b \in B, \forall y \in Y \quad (5)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{b \in B} X_{t,b,y} = R_y, \quad \forall y \in Y \quad (6)$$

$$\sum_{y \in Y} \sum_{b \in B} X_{t,b,y} \leq Mb_{\max} - I_t, \quad \forall t \in T \quad (7)$$

Geração das instâncias

- Analisando as informações contidas em [Topal, 2010], constatou-se que os dados de disponibilidade e custo de manutenção dos caminhões estão incompletos, de forma que a instância executada pelo autor não possa ser replicada.
- Infelizmente, os dados de custo de manutenção e de planejamento de longo prazo também não estavam disponíveis para minas reais
- Então optou-se por gerar alguns destes valores de forma artificial, seguindo as recomendações da literatura

Disponibilidade e idade dos caminhões

Disponibilidade

$$A_{t,y} \sim \mathcal{U}_{[0.9,0.95]} * 365 * 24 \quad (8)$$

Idade dos caminhões

$$I_t \sim \mathcal{U}_{[0,20000]} \quad (9)$$

Produção anual

Produção anual

$$R_y \sim \mathcal{U}_{[0.7,0.8]} * 365 * 24 * t_{max} \quad (10)$$

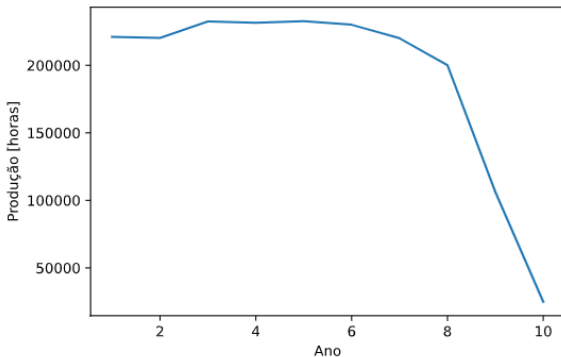
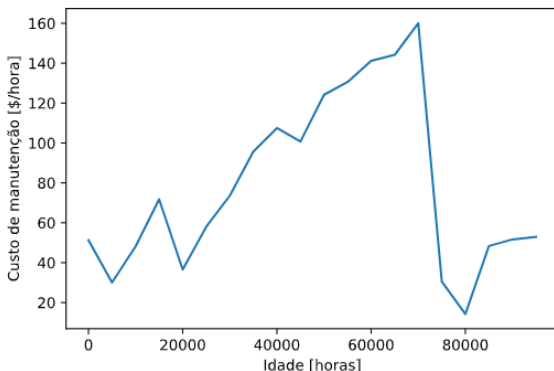


Figura: Exemplo de produção anual

Custo de manutenção

- Os custos de manutenção variam de forma não-linear de acordo com a idade do caminhão e tendem a aumentar até um ponto onde um grande reparo é necessário [Nakousi, 2018]
- Entranto, como os caminhões podem possuir idades iniciais distintas, os custos de manutenção precisam ser ajustados



Método de solução

- Como foi formulado um problema de programação linear inteiro de larga escala e com muitas restrições, ele será resolvido utilizando o algoritmo Branch & Cut com o CPLEX
- Implementado na linguagem de programação Python versão 3.7.7
- Executado em um notebook com Intel Core i7 Quad Core 2.4GHz, 8GB de memória RAM

Desenho do experimento

O algoritmo será avaliado sobre 4 instâncias distintas do problema.
O número de faixas de idade será igual a 20 para todas as instâncias.

Tabela: Valores de cada instância gerada

	Pequena	Média	Grande	Artigo
Caminhões	5	20	45	34
Anos	3	5	10	10
M	2000	4000	5000	5000
Idade crítica	16000	40000	75000	75000

Na instância **Artigo**, serão considerados os valores disponíveis em [Topal, 2010] para objetivos de produção, número de caminhões e suas respectivas idades iniciais.

Pequena

- Um total de 480 variáveis de decisão e 567 restrições foram criadas para esta instância e o esforço computacional foi bem baixo para a sua solução, uma vez que o CPLEX encontrou o ótimo global em menos de 0.5 segundos.
- As idades iniciais foram definidas como $[0, 0, 8000 \text{ e } 8000]$ e uma produção de 25000 horas por ano.

Pequena

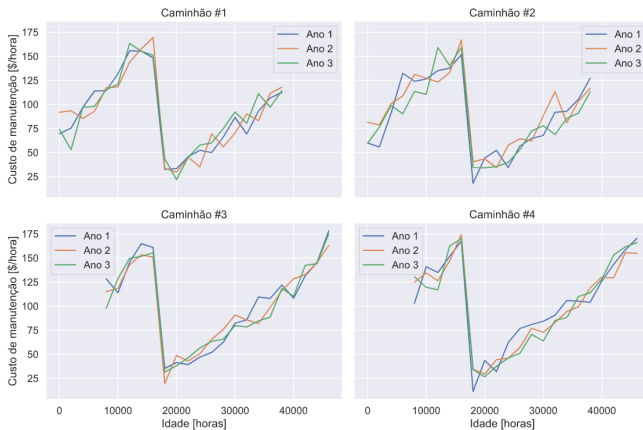


Figura: Custos de manutenção por caminhão para a instância pequena

Pequena

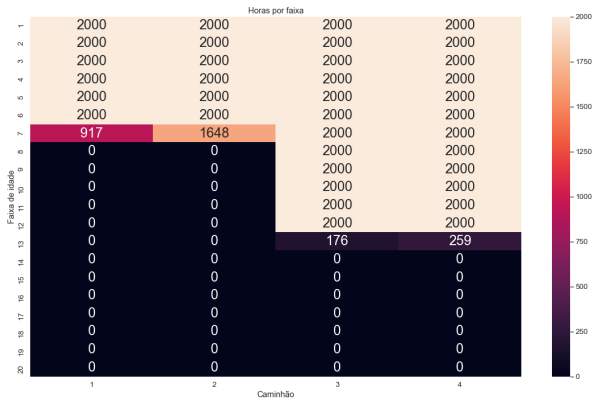


Figura: Alocação de horas por caminhão em cada faixa de idade para a instância pequena

Pequena

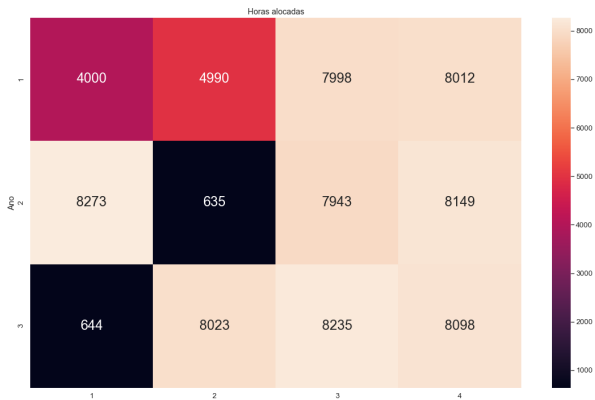


Figura: Alocação de horas por caminhão em cada ano para a instância pequena

Média

- Total de 4000 variáveis de decisão e 4425 restrições
- Esforço computacional de 3 segundos com o CPLEX

Grande

- Total de 18000 variáveis de decisão e 18955 restrições
- CPLEX conseguiu chegar ao gap relativo de 1% em cerca de 3.5 minutos

Grande

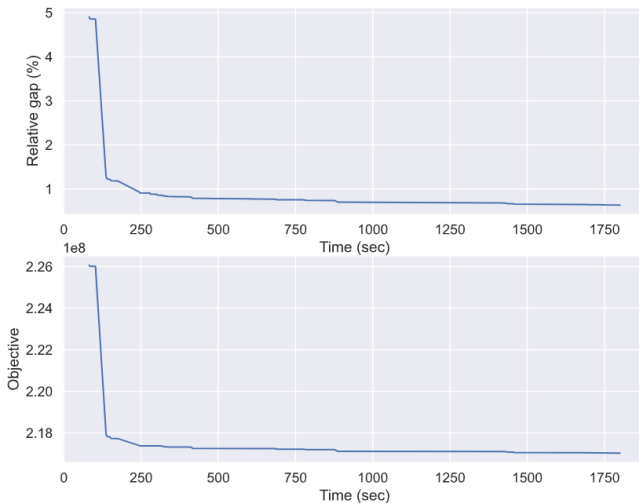


Figura: Progresso do algoritmo para a instância grande

Artigo

- Total de 13600 variáveis de decisão e 14324 restrições
- Com parâmetros padrão, o CPLEX executou durante 30 minutos para chegar a um gap relativo de 6.40%
- Ajustando a estratégia de *probing* para o nível mais agressivo, o parâmetro de ênfase para priorizar a otimalidade e ativando a heurística de busca local, executando o algoritmo por 30 minutos, foi possível chegar a um gap de 5.76%.

Artigo

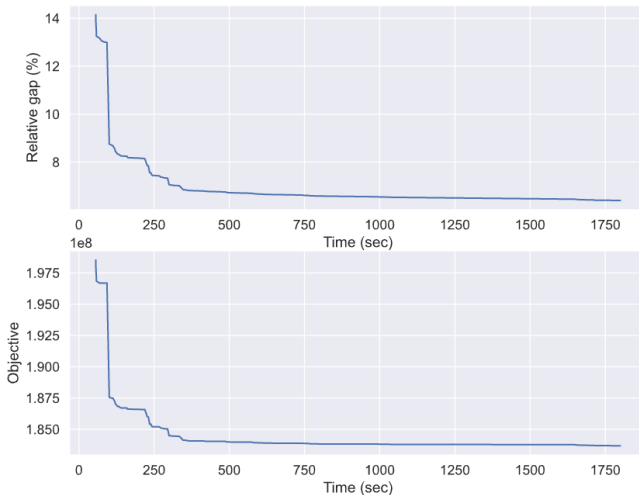


Figura: Progresso do algoritmo para a instância Artigo

Artigo

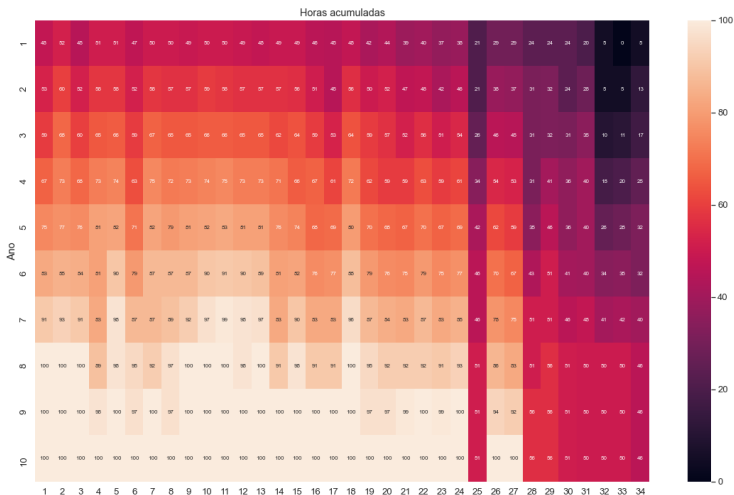


Figura: Idade dos caminhões ao longo dos anos. Os valores estão em múltiplos de 1000 horas.

Artigo

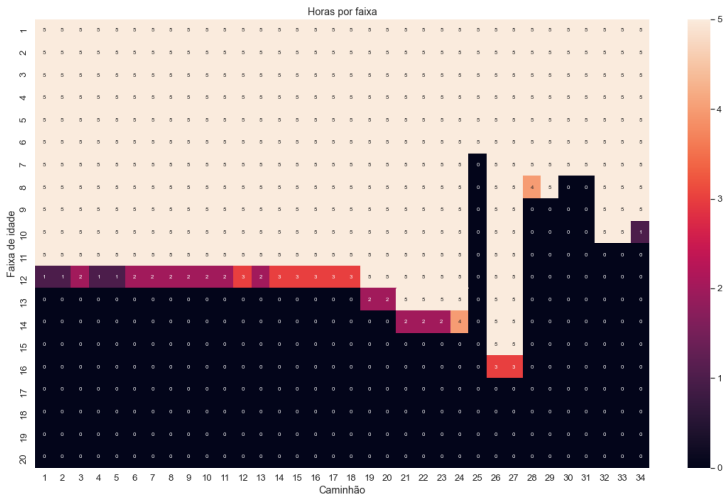


Figura: Alocação de horas por caminhão em cada faixa de idade para a instância grande

Conclusão

- Implementado um MILP para otimização da programação de equipamentos de mina de céu aberto proposto na literatura [Topal, 2010]
- Para as 3 instâncias artificiais, o CPLEX não teve grandes dificuldades para a sua solução.
- Entretanto, para dados mais próximos da realidade, foi notável o quão mais difícil o problema se tornou
- A maior dificuldade do trabalho consistiu na geração dos dados artificiais e no entendimento das equações da formulação disponível na literatura

Referências



Topal, E. and Ramazan, S., 2010. A new MIP model for mine equipment scheduling by minimizing maintenance cost. *European Journal of Operational Research*, 207(2), pp.1065-1071.



Fu, Z., Topal, E. and Erten, O., 2014. Optimisation of a mixed truck fleet schedule through a mathematical model considering a new truck-purchase option. *Mining Technology*, 123(1), pp.30-35.



Nakousi, C., Pascual, R., Anani, A., Kristjanpoller, F. and Lillo, P., 2018. An asset-management oriented methodology for mine haul-fleet usage scheduling. *Reliability Engineering & System Safety*, 180, pp.336-344.



Burt, C., Caccetta, L., Fouché, L. and Welgama, P., 2016. An MILP approach to multi-location, multi-period equipment selection for surface mining with case studies. *Journal of Industrial & Management Optimization*, 12(2), p.403.

Obrigado!