



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Sequenciamento de operações de transporte em rampas de acesso a minas subterrâneas

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia e
Gestão Industrial

Autor

Ana Isabel Teixeira Soares

Orientador

Professor Doutor Cristóvão Silva

Júri

Presidente

**Professor Doutor José Luís Ferreira Afonso
Professor na Universidade de Coimbra**

Vogais

**Professor Doutor Marta Cristina C. de Oliveira
Professor da Universidade de Coimbra**

Coimbra, Fevereiro, 2014

Agradecimentos

Durante a elaboração desta dissertação foram várias as pessoas que me apoiaram e contribuíram para a elaboração deste trabalho, entre elas gostaria de salientar o Professor Doutor Cristóvão Silva, por toda a disponibilidade e orientação prestada, pelo apoio e compreensão que sempre manifestou. À família e amigos por todo o apoio.

Resumo

As minas subterrâneas recorrem a camiões para o transporte de minério desde o seu interior até à superfície. Camiões esses, que circulam ao longo de túneis subterrâneos, denominados de rampas ou declínios onde apenas há largura para passar um camião. Por toda a extensão das rampas subterrâneas existem escapatórias que possibilitam o cruzamento de veículos em sentidos opostos. Os cruzamentos são possíveis através do desvio dos camiões vazios, que circulam em sentido descendente até à escapatória, onde aguardam que o camião carregado em sentido ascendente, passe.

O número de escapatórias e a sua localização ótima ao longo da rampa influenciam o transporte de minério, tendo um impacto significativo na boa circulação de veículos no interior da mina e na sua produtividade.

Ao longo desta dissertação foi aplicado um modelo de programação inteira mista (PIM), com o objetivo de estudar a ótima localização das escapatórias em minas subterrâneas.

O PIM permite determinar a localização das escapatórias que minimizem o tempo necessário para completar um determinado número de viagens. O modelo requer a inserção do número de veículos, de viagens, de escapatórias e dos tempos de carga e descarga para devolver o melhor movimento dos veículos e a melhor localização das escapatórias em prol de uma otimização do tempo de viagens. O PIM possibilita observar que a ótima localização das escapatórias tem implicação na minimização do tempo para completar determinado número de viagens, que são influenciados pelos tempos de carga e descarga.

Os resultados obtidos a partir do PIM mostram que as escapatórias colocadas de forma equidistante não são sempre a ótima solução para a sua localização. A melhor localização das escapatórias é a que permite intercalar veículos em sentido ascendente com veículos em sentido descendente com o menor tempo possível de espera na escapatória.

Na generalidade, a dissertação demonstra como a otimização adequada das escapatórias e dos horários dos veículos pode ter um impacto significativo na produtividade do transporte e conseqüentemente na produtividade de minas subterrâneas.

Palavras-chave: Planeamento e controlo de operações, Minas Subterrâneas, Programação Inteira Mista.

Abstract

In underground mines, haulage vehicles carry ore from underground loading bays to the surface. The vehicles travel in narrow tunnels, called declines, with occasional passing bays that allow descending empty vehicles to pull off the main path and wait for ascending laden vehicles to pass.

The number of passing bays and their locations influences the delays to descending vehicles, and hence the haulage productivity of the mine.

Throughout this study, we present a Mixed Integer Programming (MIM) model, applied in order to study the optimal location of passing-bays in underground mines.

The MIM determines the optimal location of passing-bays, to minimize the time required to complete a specified number of haulage trips. The number of vehicles, bays and time to load and unload are specified. The MIM allows observing that the optimal location of passing-bays is influenced by the time of loading and unloading.

The results obtained from the MIM shows passing-bays placed equidistantly are not always the optimum solution for your location. The best location of passing-bays allows vehicles to pass with the least possible time waiting in the escape.

Overall, the thesis shows how proper optimisation of bay locations and vehicle schedules, can have a significant impact on haulage productivity.

Keywords Optimisation, Integer Programming, Underground Mine.

Índice

Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xiii
Índice de Gráficos.....	xv
Simbologia e Siglas	xvii
Simbologia.....	xvii
Siglas	xviii
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento teórico	1
1.2. Objetivos	3
2. Revisão bibliográfica.....	5
2.1. Introdução	5
2.2. Gestão de operações em minas subterrâneas	5
2.3. Gestão de tráfego em linhas ferroviárias.....	9
3. Descrição do problema	11
3.1. Introdução	11
4. Modelo matemático	15
4.1. Introdução	15
4.2. Descrição do modelo.....	16
5. Implementação do modelo.....	25
5.1. Introdução	25
5.2. Modelo de otimização no Excel.....	29
6. Resultados do modelo matemático	33
6.1. Cenário 1	35
6.2. Cenário 2	39
6.3. Cenário 3	45
6.4. Conclusão.....	47
7. Conclusão	49
7.1. Aspetos possíveis de melhorar no futuro	51
7.2. Dificuldades durante o desenvolvimento	51
8. Bibliografia.....	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Planta de uma secção de uma mina.....	3
Figura 3.1. Exemplo de uma rampa única.....	11
Figura 3.2. Esquema de uma viagem completa.....	12
Figura 4.1. Esquema de uma rampa simples com as escapatórias representadas a vermelho.	16
Figura 4.2. Segmento entre escapatórias.....	17
Figura 4.3. Conflito de dois veículos em sentidos opostos.....	22
Figura 4.4. Resolução do conflito de dois veículos em sentidos opostos.....	22
Figura 4.5. Resolução do conflito de dois veículos em sentidos opostos.....	23
Figura 5.1. Esquema da folha de cálculo.....	30
Figura 5.2. Caixa de diálogo de parâmetros do solver.....	31
Figura 5.3. Introdução da célula destino.....	31
Figura 5.4. Introdução de células variáveis.....	31
Figura 5.5. Introdução das restrições.....	31
Figura 5.6. Opções do solver.....	32
Figura 5.7. Modelo construído no solver.....	32

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 5.1. Estudo da dimensão do problema.....	26
Tabela 6.1. Tabela de parâmetros.....	33
Tabela 6.2. Parâmetros de tempo de carga e descarga.....	35
Tabela 6.3. Tabela referente ao comprimento dos segmentos da rampa.....	35
Tabela 6.4. Tabela da influência dos tempos de carga e descarga.....	36
Tabela 6.5. Tabela de resultados obtidos nas células variáveis do cenário 1, retirada da folha de cálculo.....	38
Tabela 6.6. Valor da função objetivo, para o primeiro cenário.....	38
Tabela 6.7. Tabela de parâmetros do tempo de carga e descarga usados no segundo cenário.....	39
Tabela 6.8. Tabela relativa ao comprimento dos segmentos da rampa do cenário dois.....	39
Tabela 6.9. Tabela da influência dos tempos de carga e descarga.....	40
Tabela 6.10. Tabela dos tempos de espera na escapatória, obtidos na simulação da folha de cálculo.....	41
Tabela 6.11. Tabela de resultados obtidos nas células variáveis, retirada da folha de cálculo.....	42
Tabela 6.12. Tabela do resultado da função objetivo relativa ao segundo cenário.....	42
Tabela 6.13. Tabela do resultado obtidos nas células variáveis, retirada da folha de cálculo.	43
Tabela 6.14. Tabela do resultado da função objetivo relativa ao segundo cenário.....	44
Tabela 6.15. Tabela de parâmetros do tempo de carga e descarga usados no terceiro cenário.....	45

Tabela 6.16. Tabela do comprimento dos segmentos da rampa para o terceiro cenário.	46
Tabela 6.17. Tabela de resultados obtidos nas células variáveis, retirada da folha de cálculo.....	46
Tabela 6.18. Tabela do resultado da função objetivo relativa ao segundo cenário.	46
Tabela 6.19. Tabela do comprimento dos segmentos da rampa.....	47

ÍNDICE DE GRÁFICOS

- Gráfico 6.1. Gráfico da simulação do primeiro cenário. 37
- Gráfico 6.2. Gráfico obtido na simulação do segundo cenário 2, demonstra o movimento de dois veículos que realizam três viagens cada um. O eixo vertical representa as localizações, sendo 0 a superfície da mina, 1 a escapatória e 2 o carregador. O eixo horizontal corresponde ao tempo. Os dois veículos são representados em cores diferentes, e cada viagem com uma cor diferente..... 40
- Gráfico 6.3. Gráfico obtido na simulação do segundo cenário 2, demonstra o movimento de dois veículos que realizam três viagens cada um. O eixo vertical representa as localizações, sendo 0 a superfície da mina, 1 a escapatória e 2 o carregador. O eixo horizontal corresponde ao tempo. Os dois veículos são representados em cores diferentes, e cada viagem com uma cor diferente..... 44
- Gráfico 6.4. Gráfico referente ao cenário 3 demonstra o movimento de dois veículos que realizam três viagens cada um. O eixo vertical representa as localizações, sendo 0 a superfície da mina, 1 a escapatória e 2 o carregador. O eixo horizontal corresponde ao tempo. Os dois veículos são representados em cores diferentes, e cada viagem com uma cor diferente..... 45

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

$\mathcal{L} = \{0, 1 \dots L + 1\}$ Conjunto de localizações

$\mathcal{T} = \{1, 2 \dots T\}$ Conjunto de viagens

$C_{j,l}^D$ Hora da chegada da viagem j ao local l na direção do carregador,
 $j \in \mathcal{T}, l \in \mathcal{L}$

$C_{j,l}^S$ Hora da chegada da viagem j ao local l no sentido do exterior, $j \in \mathcal{T}, l \in \mathcal{L}$

F_j Tempo de espera da viagem j no carregador, $j \in \mathcal{T}$.

$P_{j,l}^D$ Hora da partida da viagem j do local l no sentido do carregador, $j \in \mathcal{T}, l \in \mathcal{L} \setminus \{L + 1\}$

$P_{j,l}^S$ Hora da partida da viagem j do local l na direção do exterior, $j \in \mathcal{T}, l \in \mathcal{L} \setminus \{0\}$

t_c Tempo de carga no carregador

t_d Tempo de descarga na superfície

v^D Velocidade dos veículos em direção ao carregador

v^S Velocidade dos veículos em direção ao exterior

x_l Comprimento entre localizações l e $l + 1, l \in \mathcal{L} \setminus \{L + 1\}$

h Tempo de segurança entre veículos a circular na mesma direção

L Número de escapatórias

T Número de viagens a completar

V Número de veículos

X Tamanho da rampa

Siglas

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

PIM – Programação inteira mista

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento teórico

O principal objetivo da exploração de minas subterrâneas é a extração de um determinado recurso mineral e o seu transporte, desde o seu ponto de extração no interior da mina até à superfície. Todo este processo é bastante complexo e requer a tomada de decisões a nível estratégico e operacional.

Uma mina subterrânea é constituída por um conjunto de túneis (rampas) interligados entre si, formando uma rede na qual circula uma frota de veículos. A frota de veículos é constituída não só pelos camiões para transporte de minério do local de extração para a superfície, como também por toda a maquinaria necessária à exploração de minério (perfuradoras, pás carregadoras, carrinhas de transporte de operários, camiões de reabastecimento da maquinaria de exploração durante o horário de funcionamento).

Ao longo dos anos têm sido apresentados na literatura métodos desenvolvidos para apoio às decisões estratégicas a tomar na gestão de operações em minas subterrâneas. Estes métodos baseados em ferramentas de investigação operacional, como programação matemática ou simulação, têm por objetivo determinar a configuração da rede de túneis, a otimização da localização de escapatórias para cruzamento de veículos e a escolha dos métodos de extração ou tecnologias de produção. No entanto, pouco tem sido feito no que concerne ao apoio às decisões de nível operacional a tomar para o planeamento e controlo das operações em minas subterrâneas.

As decisões operacionais são de fulcral importância na operação de minas subterrâneas e consistem em determinar a sequência de operações a ser realizada por cada veículo que circula na mina, tal como as suas rotas. Estas decisões têm em vista a maximização do transporte de minério para o exterior da mina por dia de trabalho ou/turno (unidade de tempo utilizada para “medir ” a produtividade de uma mina). Estas decisões assumem um elevado grau de complexidade devido à grande quantidade de restrições existentes:

- Número de veículos a circular;
- Velocidades de circulação limitadas por motivos tecnológicos e de segurança;
- Diferentes tipos de veículos;
- Existência de cruzamentos e respectivas regras de prioridade;
- Dimensão limitada dos túneis que impede o cruzamento de veículos a circular em sentidos opostos;
- Existência de um número limitado de escapatórias, onde os veículos se podem cruzar, e tempos de espera de veículos nas referidas escapatórias para evitar o cruzamento fora das mesmas.

1.2. Objetivos

O trabalho elaborado tem como propósito desenvolver modelos para a gestão operacional de tráfego no interior de minas subterrâneas. Nesse sentido, foi desenvolvido um algoritmo com o intuito de aumentar a quantidade de minério que sai da mina por unidade de tempo e assim aumentar a sua produtividade.

Com esta dissertação é dado um primeiro passo no sentido de desenvolver um conjunto de sistemas de apoio à decisão, na elaboração de planos diários para a frota de veículos que circula no interior de uma mina subterrânea.

As minas subterrâneas podem ter configurações extremamente complexas, como observado no exemplo da Figura 1.1.

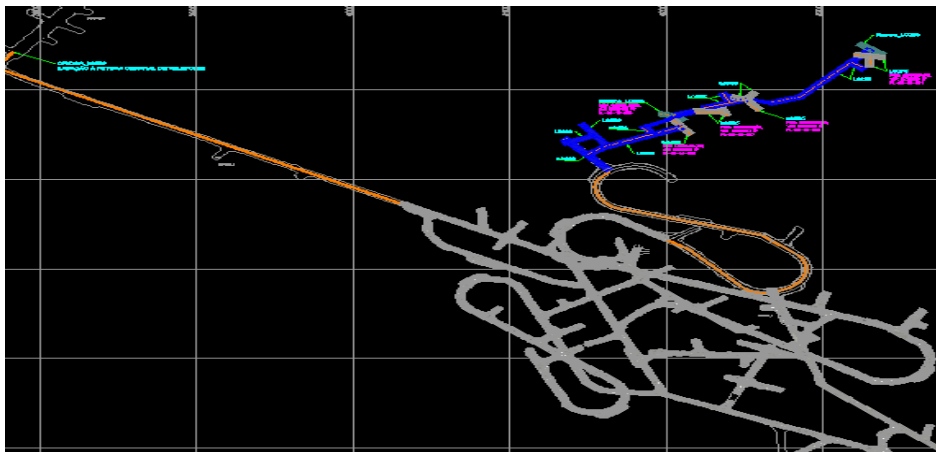


Figura 1.1. Planta de uma secção de uma mina.

Sendo esta uma primeira abordagem ao problema, foi decidido que o estudo se limitaria à configuração mais simples associada a este tipo de operação: uma rampa única, sem cruzamentos, com um único tipo de veículos a circular em ambos os sentidos. As características da rampa não permitem cruzamentos entre veículos a circular em sentidos opostos, pelo que um determinado número de escapatórias existem ao longo da rampa para permitir o cruzamento de veículos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Introdução

Neste capítulo será apresentado um enquadramento teórico que contempla os principais conceitos e técnicas do estudo realizado. Com base em literatura nacional e internacional disponível, será analisado o problema de gestão de tráfego em minas subterrâneas. Como se verá posteriormente, o problema abordado neste projeto é semelhante ao de uma rede ferroviária de linha única, sendo por isso realizada uma revisão da literatura referente a este tipo de problemas para possíveis conhecimentos transferíveis.

2.2. Gestão de operações em minas subterrâneas

Num mundo envolto de grande competição e de constante mudança, a flexibilidade operacional e a adaptabilidade estratégica têm sido cada vez mais reconhecidas como fundamentais para o sucesso das empresas a longo prazo (1).

Para as grandes minas subterrâneas é essencial o planeamento estratégico a longo prazo, para a melhor utilização dos recursos disponíveis. A utilização do planeamento estratégico leva a uma redução de tempo para a obtenção de soluções, sem perdas de qualidade, facilitando a rápida avaliação de estratégias alternativas (2).

A grande maioria da literatura referente à gestão de operações em minas subterrâneas tem abordado questões estratégicas. Os problemas abordados a este nível podem ser:

- Definição da configuração da mina;
- Seleção do modo de transporte (transporte em carris ou camiões);
- Seleção das frentes de extração a explorar, entre outros.

Todas estas questões assumem especial relevo na fase de planeamento da exploração de uma mina. No entanto, após essas decisões terem sido tomadas é necessário garantir uma operação eficiente das atividades a executar.

As decisões de nível operacional podem ser apoiadas por um conjunto de ferramentas bem conhecidas da investigação operacional. Entre elas destacam-se a simulação e a programação linear, inteira ou mista. De seguida apresentam-se alguns exemplos da aplicação destas ferramentas ao problema de gestão de tráfego em minas subterrâneas.

2.2.1 Simulação de veículos no interior de minas subterrâneas

A simulação tem sido amplamente utilizada para estudar e melhorar as operações no sector mineiro, pois é um importante instrumento de auxílio às tomadas de decisão. Alguns trabalhos têm sido feitos para melhorar a produtividade do transporte para uma determinada infraestrutura.

Sturgal et al, 1996, apresentam uma simulação do movimento de camiões de minério numa mina subterrânea com uma única rampa e seis escapatórias. As escapatórias são colocadas em intervalos de distância diferentes, sendo que cada uma delas apenas comporta um camião. Foram implementados dois diferentes tipos de expedição de camiões e comparada a produção de minério com base nos camiões que entravam na mina. A prioridade é dada aos camiões carregados. No primeiro método de expedição é apenas permitido um camião numa secção num dado instante, o que não é uma opção viável para minas com longas secções entre escapatórias. O segundo e mais eficiente modo de expedição, só permite um camião descarregado de cada vez nos troços entre escapatórias, contudo como os camiões carregados têm prioridade, estes podem seguir juntos nas secções entre escapatórias (3).

Um estudo de simulação de tráfego de camiões no interior de minas subterrâneas efetuado nas minas Callie, Austrália, usa a localização de escapatórias fixa

e tamanho variável, para acomodar um ou dois camiões, sendo analisados os dados operacionais inerentes ao estudo. Consideraram-se dois distribuidores diferentes para controlar os movimentos do camião. Ambos os distribuidores permitem no máximo um camião em qualquer secção a qualquer momento. O primeiro distribuidor não dá prioridade a qualquer direção dos camiões. O segundo distribuidor dá prioridade aos camiões no sentido exterior da mina, camiões carregados. Os camiões descarregados só podem passar para uma secção seguinte se as duas secções adjacentes estiverem desimpedidas de qualquer camião carregado. Com a comunicação de rádio entre os motoristas, torna-se mais eficiente e fácil a comunicação entre os camiões descarregados e carregados, para saberem se podem avançar até à aproxima escapatória antes de algum camião carregado a alcançar (4).

Muitas minas australianas de extração de minério usam camiões para transporte da extração efetuada desde o interior da mina até ao exterior. A produtividade de um sistema de transporte de uma mina é analisada pelas toneladas de minério rebocadas para o exterior, por turno. Para uma mina de rampa única é necessário a construção de escapatórias de aproximadamente 20 ou 30 metros de comprimento. Se as escapatórias forem colocadas com muito espaçamento entre elas, os camiões em sentido descendente gastam muito tempo para conseguir chegar ao carregador, uma vez que têm de esperar que o camião em sentido ascendente passe. Por outro lado, a colocação dessas mesmas escapatórias muito perto é desperdício, pois nem sempre se mostram vantajosas para o aumento da produtividade tendo em consideração o elevado custo inicial para a sua construção. O espaçamento das escapatórias tem um impacto significativo na produtividade da mina. O espaçamento deve ser menor do que a distância crítica para fazer face às variações dos períodos de carga e descarga. As escapatórias nem sempre podem ser localizadas no local tido como ideal para o transporte, devido ao *layout* da mina e suas restrições (5).

Anjomshoa, 2011, desenvolveu um simulador de movimento dos veículos dentro de uma mina com escapatórias, onde os espaçamentos se encontravam bem

delineados. Uma característica notável do simulador é o método eficiente para evitar o impasse entre veículos. Usando o simulador, demonstra-se que se as escapatórias não estiverem muito afastadas entre si os caminhões em sentido descendente podem ser intercalados com os caminhões em sentido ascendente, aumentando a produtividade. O simulador pode ser utilizado para avaliar a produtividade em função de diferentes espaçamentos entre escapatórias (6).

2.2.2. Modelos matemáticos aplicados à gestão de tráfego em minas subterrâneas

Para a extração de minério em minas subterrâneas a técnica muitas vezes utilizada é a determinação das sequências de tempo e de operações. Esta sequência apenas pode ser determinada pelo desenvolvimento de um modelo matemático, como por exemplo um modelo de programação PIM.

Newman, apresenta um modelo deste tipo desenvolvido com o objetivo de minimizar o desvio entre as quantidades de produção real e a planeada, de forma a aumentar a produtividade de uma mina subterrânea. Este modelo foi desenvolvido para as minas kiruma (2).

O desenvolvimento de um modelo matemático de programação inteira mista, PIM, permitiu encontrar o espaçamento ideal entre escapatórias, e o ótimo movimento dos veículos. Este modelo investiga se o espaçamento crítico das escapatórias é o ideal. A formulação do PIM requer a introdução de restrições e de uma função objetivo. Este demonstra que para um determinado número de veículos, aumentando o número de escapatórias e introduzindo-as de forma otimizada, conseguem-se aumentos significativos de produtividade. Simultaneamente para um dado número de escapatórias o aumento do número de veículos vai melhorar a produtividade, de forma a manter o carregador sempre em uso (6).

2.3. Gestão de tráfego em linhas ferroviárias

O problema analisado neste trabalho é em tudo semelhante ao da circulação de comboios em linha única, sendo que os mesmos apenas se podem cruzar nas estações. Desta forma procurou-se identificar alguma literatura referente a este tipo de problema pela sua semelhança com o caso de estudo em análise.

Uma grande maioria das linhas de comboio de baixo tráfego são linhas únicas entre estações, que as separam e têm de albergar ambos os sentidos. A decisão de manter estas linhas únicas é uma decisão estratégica que se fundamenta nos grandes custos associados à construção de uma nova, bem como a manutenção de duas linhas, considerando que são de baixo tráfego.

Nas linhas únicas são recorrentes os seguintes conflitos:

- Presença de dois comboios com sentidos opostos na mesma linha;
- Ultrapassagem de comboios.

É necessário encontrar soluções para prevenir que ocorram os conflitos. Nesse sentido, foi desenvolvido um programa que simula o movimento dos veículos através da simulação de horários de um comboio e a previsão de possíveis conflitos. Este simulador além de criar listas dos conflitos detetados, permite ao utilizador interagir com o programa e introduzir alterações nos horários.

Ao longo da linha existem escapatórias que funcionam com semáforos que regulam e delimitam as entradas nos diversos cantões (troço entre escapatórias), para que nunca esteja mais do que um comboio em cada cantão. As escapatórias servem para que um dos comboios entre e aguarde pela passagem de outro em sentido contrário (7).

3. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

3.1. Introdução

Na resolução deste problema será considerada uma mina subterrânea típica. Pelo facto de ser uma primeira abordagem ao problema, esta foi analisada como uma rampa única dividida em segmentos entre as escapatórias.

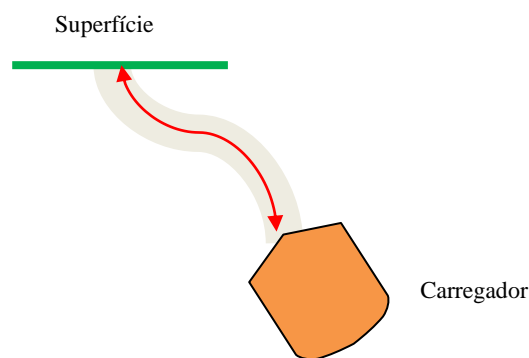


Figura 3.1. Exemplo de uma rampa única.

O objetivo do problema é analisar o impacto das escapatórias e das restrições no movimento dos veículos no interior da mina e na produtividade da mesma. A produtividade de uma mina depende de vários fatores:

- Comprimento da rampa;
- Velocidade de subida e descida dos veículos;
- Número de veículos na frota;
- Duração da carga e descarga;
- Número de escapatórias;
- Restrições dos movimentos dos veículos.

A largura dos túneis do interior de minas subterrâneas apenas permite a passagem de um caminhão de cada vez, resultando daí a necessidade da existência de escapatórias. Pelo termo escapatórias, depreende-se que são locais ao longo de túneis que permitam a circulação de veículos em sentidos opostos. Cada escapatória comporta apenas um veículo de cada vez na direção do carregador, de modo a permitir a passagem de veículos carregados. Os veículos previamente carregados em sentido ascendente não podem parar durante a subida até à superfície. Aos mesmos não é permitido fazer inversão de marcha durante todo o trajeto de subida ou descida da rampa, sendo que a mudança de direção apenas ocorre no carregador. Este carrega apenas um veículo de cada vez e por ordem de chegada de cada caminhão, o que poderá em alguns casos conduzir à existência de filas de espera para efetuar o carregamento. A descarga é efetuada à superfície sem obedecer a qualquer ordem, sendo que apesar dessa aleatoriedade cada caminhão descarrega conforme a sua chegada. O início e o fim dos turnos de cada veículo decorrem sempre à superfície.

Escapatórias estrategicamente bem colocadas impedem que exista um bloqueio do túnel, que levaria a enormes perdas de tempo e conseqüentemente de produtividade. O número de escapatórias influencia o movimento dos veículos no túnel e a sua boa circulação. A produtividade de uma mina é medida pela quantidade de minério recolhido para a superfície por turno. Maximizar o número de viagens implica o aumento do minério recolhido para a superfície, bem como da sua produtividade. Uma viagem corresponde a ir da superfície ao carregador e o seu retorno, como representado na Figura 3.2.

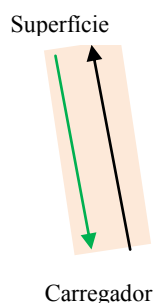


Figura 3.2. Esquema de uma viagem completa.

A principal resistência à resolução deste problema reside em definir o número apropriado de escapatórias e a sua localização ótima, tal como a melhor sequência de movimentos de toda a frota de veículos no interior da mina de forma a minimizar o tempo necessário para completar um dado número de viagens.

4. MODELO MATEMÁTICO

4.1. Introdução

Neste capítulo foi iniciada a construção de um modelo matemático com base no PIM, objetivando a determinação do local ótimo de colocação das escapatórias numa mina subterrânea. Este modelo matemático também é capaz de gerar o melhor movimento dos veículos, especificando a hora a que cada veículo chega e parte de cada localização. Embora o objetivo deste modelo seja maximizar a produtividade da mina, no modelo matemático minimizamos o tempo total necessário para completar um dado número de viagens.

Este capítulo é fundamentado no estudo e resultados originais realizados e publicados em Anjomshoa 2011.

4.2. Descrição do modelo

No decorrer deste capítulo descreve-se em detalhe o modelo matemático de PIM usado para a resolução do problema.

a) Notação usada

- V Número de veículos;
- L Número de escapatórias;
- T Número de viagens a completar;
- X Tamanho da rampa;
- h Tempo de segurança entre veículos a circular na mesma direção;
- v^D Velocidade dos veículos em direção ao carregador;
- v^S Velocidade dos veículos em direção ao exterior;
- t_d Tempo de descarga na superfície;
- t_c Tempo de carga no carregador.

Para uma melhor organização e percepção foram definidos dois conjuntos, um de localizações $\mathcal{L} = \{0, 1 \dots L + 1\}$, onde 0 é definido como a superfície e $L+1$ como o carregador, sendo todas as localizações entre 0 e $L+1$ escapatórias, e um conjunto de viagens $\mathcal{T} = \{1, 2 \dots T\}$.

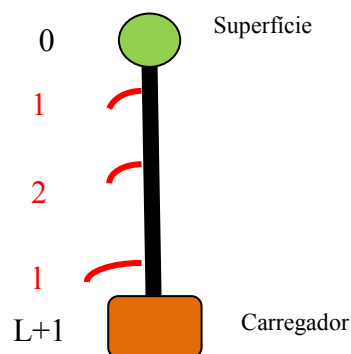


Figura 4.1. Esquema de uma rampa simples com as escapatórias representadas a vermelho.

b) Variáveis contínuas

x_l Comprimento entre localizações l e $l + 1$, $l \in \mathcal{L} \setminus \{L + 1\}$

$P_{j,l}^D$ Hora da partida da viagem j do local l no sentido do carregador, $j \in \mathcal{T}, l \in \mathcal{L} \setminus \{L + 1\}$

- A viagem j sai da superfície em direção ao carregador no momento $P_{j,0}^D$ e chega ao carregador no momento $C_{j,L+1}^D$.

$P_{j,l}^S$ Hora da partida da viagem j do local l na direção do exterior, $j \in \mathcal{T}, l \in \mathcal{L} \setminus \{0\}$

- A viagem j sai do carregador no momento $P_{j,L+1}^S$.

$C_{j,l}^D$ Hora da chegada da viagem j ao local l na direção do carregador, $j \in \mathcal{T}, l \in \mathcal{L}$

- No momento $C_{j,0}^D$ a viagem j esta preparada para sair da superfície em direção ao carregador.

$C_{j,l}^S$ Hora da chegada da viagem j ao local l no sentido do exterior, $j \in \mathcal{T}, l \in \mathcal{L}$

- Depois de carregada a viagem j esta pronta para partir do carregador no momento $C_{j,L+1}^S$

F_j Tempo de espera da viagem j no carregador, $j \in \mathcal{T}$

Como as viagens de regresso ao exterior têm prioridade e não param durante toda a subida $C_{j,l}^S = P_{j,l}^S$

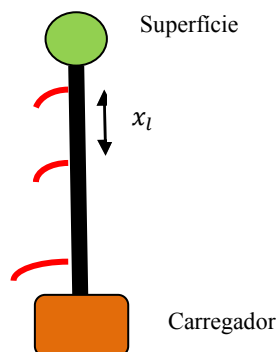


Figura 4.2. Segmento entre escapatórias.

c) Função objetivo

O objetivo é minimizar o tempo a que a última viagem descarrega à superfície.

$$\min C_{T,0}^S + t_d \quad [4.1]$$

d) Restrições

Para que o modelo funcione corretamente é necessário a introdução de restrições que evitem o bloqueio do modelo.

- **Comprimento do segmento:**

A soma de todos os segmentos deve ser igual ao tamanho da rampa.

$$X = \sum_{l=0}^L x_l \quad [4.2]$$

- **Tempos à superfície:**

Todos os veículos têm o ponto de partida à superfície.

$$C_{j,0}^D = 0 \quad \forall j = 1, \dots, V \quad [4.3]$$

- **Tempo de viagem entre escapatórias:**

Tempo entre escapatórias para a viagem j na direção do carregador:

$$P_{j,l-1}^D + \frac{x_{l-1}}{v^D} = C_{j,l}^D \quad \forall j \in \mathcal{J}, \forall l \in \mathcal{L} \setminus \{0\} \quad [4.4]$$

Tempo entre escapatórias no sentido exterior para a viagem j :

$$P_{j,l+1}^S + \frac{x_l}{v^S} = C_{j,l}^S \quad \forall t \in \mathcal{T}, \forall l \in \mathcal{L} \setminus \{L+1\} \quad [4.5]$$

- **Tempos de segurança entre viagens:**

Por razões de segurança foi necessário introduzir um tempo entre as saídas de veículos na mesma direção.

Tempo de segurança entre as viagens j e $j-1$ no sentido do carregador:

$$P_{j,l}^D - P_{j-1,l}^D \geq h \quad \forall j \in \mathcal{T} \setminus \{1\}, \forall l \in \mathcal{L} \setminus \{L+1\} \quad [4.6]$$

Tempo de segurança no sentido exterior entre as viagens j e $j-1$:

$$P_{j,l}^S - P_{j-1,l}^S \geq h \quad \forall j \in \mathcal{T} \setminus \{1\}, \forall l \in \mathcal{L} \setminus \{0\} \quad [4.7]$$

- **Capacidade das escapatórias**

Cada escapatória apenas tem a capacidade de albergar um veículo de cada vez.

$$P_{j-1,l}^D + h \leq C_{j,l}^D \quad \forall j \in \mathcal{T} \setminus \{1\}, \forall l \in \mathcal{L} \setminus \{0, L+1\} \quad [4.8]$$

Nenhum veículo pode entrar na escapatória sem que o veículo anterior tenha partido. Como na viagem de sentido exterior não pode haver paragens, não é necessário verificar a capacidade das escapatórias neste caso.

É de considerar que no carregador e à superfície onde são realizadas as cargas e descargas, exista espaço suficiente, o que leva a que não seja necessário verificar a capacidade nestes dois pontos.

- ***Tempo de partida e de chegada para as viagens no sentido do carregador***

Os veículos no sentido do carregador não podem partir de uma determinada localização sem antes ter chegado:

$$P_{j,l}^D \geq C_{j,l}^D \quad \forall j \in \mathcal{T}, \forall l \in \mathcal{L} \setminus \{L + 1\} \quad [4.9]$$

Esta restrição permite que as viagens no sentido do carregador possam esperar no mesmo, quando assim for necessário.

- ***Tempo de partida e chegada para as viagens no sentido do exterior***

A viagem no sentido exterior tem prioridade sobre as viagens no sentido do carregador, e portanto não efetuam paragens desde o carregador até à superfície.

$$P_{j,l}^S = C_{j,l}^S \quad \forall j \in \mathcal{T}, \forall l \in \mathcal{L} \setminus \{0, L + 1\} \quad [4.10]$$

Quando o veículo no sentido exterior chega à superfície, significa que aquela viagem acabou, descartando a necessidade do cálculo do tempo de partida e chegada.

- ***Descarregamento***

Na superfície, após a descarga, o veículo j volta a estar pronto para efetuar mais viagens no sentido do carregador:

$$C_{j,0}^S + t_d = C_{j+V,0}^D \quad \forall j \in \{1, \dots, T - V\} \quad [4.11]$$

- **Carregamento no interior da mina**

$$C_{j,L+1}^D + t_c + F_j = C_{j,L+1}^S \quad \forall j \in \mathcal{J} \quad [4.12]$$

Esta restrição assegura o tempo mínimo de carregamento e inclui o tempo de espera, se necessário.

Depois de terminado o carregamento o veículo está pronto a partir, mas pode ter de aguardar no carregador que o último segmento da rampa esteja livre para a viagem até à superfície. Assim, o momento em que o veículo j está pronto a partir pode ser diferente do momento em que o veículo parte:

$$P_{j,L+1}^S \geq C_{j,L+1}^S \quad \forall j \in \mathcal{J} \quad [4.13]$$

- **Tempo de espera no carregador**

$$F_j \geq C_{j-1,L+1}^S - C_{j,L+1}^D \quad \forall j \in \mathcal{J} \setminus \{1\}; F_1 = 0 \quad [4.14]$$

Na primeira viagem não existe fila de espera no carregador e $F_1 = 0$

A viagem $j-1$ está pronta a voltar à superfície no momento:

$$C_{j-1,L+1}^S = C_{j-1,L+1}^D + t_c + F_{j-1} \quad [4.15]$$

Se a hora de chegada da viagem seguinte, $C_{j,L+1}^D$, ao carregador for menor que a hora a que a viagem anterior, $C_{j-1,L+1}^S$, fica pronta a partir, então a viagem j tem de esperar no carregador que o veículo anterior acabe de ser carregado. A duração do tempo que o veículo j tem de esperar no carregador é dada pela seguinte expressão:

$$C_{j-1,L+1}^S - C_{j,L+1}^D \quad [4.16]$$

Por outro lado, se a viagem j chega ao carregador depois da viagem $j-l$ estar carregada o tempo em fila de espera para carregar será zero e a expressão anterior negativa.

De modo geral o tempo em fila de espera é dado pela expressão:

$$\max \{0, C_{j-1,L+1}^S - C_{j,L+1}^D \} \quad [4.17]$$

• **Veículos em sentidos opostos no mesmo segmento**

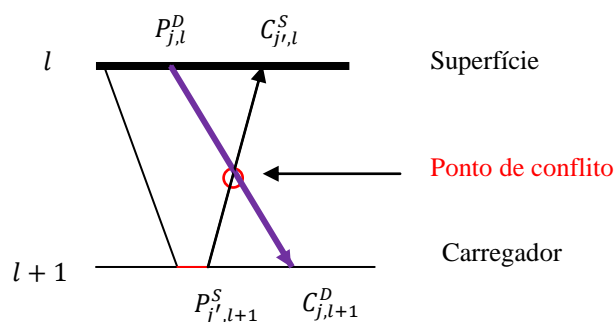


Figura 4.3. Conflito de dois veículos em sentidos opostos.

A existência de veículos em sentidos opostos no mesmo segmento leva à existência de conflito. De forma a debelar este problema, ou mesmo evitá-lo, é necessário que uma das duas seguintes situações ocorra:

A viagem j apenas parte da localização l depois da viagem j' ter chegado:

$$C_{j',l}^S \leq P_{j,l}^D \quad \forall j, j' \in T, j - V < j' < j, \forall l \in \mathcal{L} \setminus \{L + 1\} \quad [4.18]$$

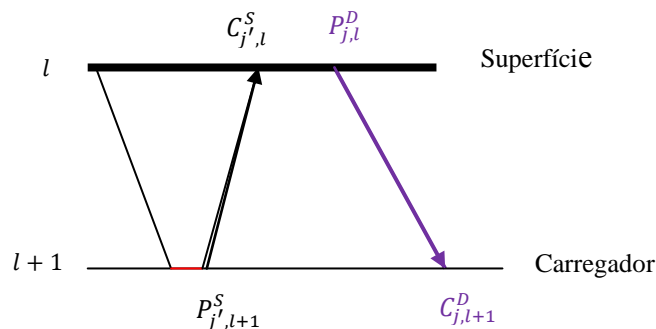


Figura 4.4. Resolução do conflito de dois veículos em sentidos opostos.

Ou a viagem j chega ao local $l+1$ antes da viagem j' ter partido:

$$C_{j,l+1}^D \leq P_{j',l+1}^S \quad \forall j, j' \in \mathcal{T}, j - V < j' < j, \forall l \in \mathcal{L} \setminus \{L + 1\} \quad [4.19]$$

E a viagem j' parte do local l antes da viagem j ter partido:

$$P_{j',l}^S \leq P_{j,l}^D \quad \forall j, j' \in \mathcal{T}, j - V < j' < j, \forall l \in \mathcal{L} \setminus \{0, L + 1\} \quad [4.20]$$

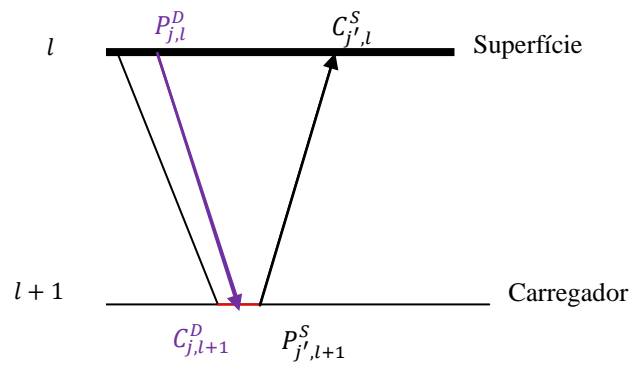


Figura 4.5. Resolução do conflito de dois veículos em sentidos opostos.

e) Restrições não negativas

$$C_{j,l}^D \geq 0, \quad \forall j \in \mathcal{T}, \forall l \in \mathcal{L} \quad [4.21]$$

$$C_{j,l}^S \geq 0, \quad \forall j \in \mathcal{T}, \forall l \in \mathcal{L} \quad [4.22]$$

$$P_{j,l}^D \geq 0, \quad \forall j \in \mathcal{T}, \forall l \in \mathcal{L} \setminus \{L+1\} \quad [4.23]$$

$$P_{j,l}^S \geq 0, \quad \forall j \in \mathcal{T}, \forall l \in \mathcal{L} \setminus \{0\} \quad [4.24]$$

$$x_l \geq 0, \quad \forall l \in \mathcal{L} \setminus \{L+1\} \quad [4.25]$$

$$F_j \geq 0, \quad \forall j \in \mathcal{T} \quad [4.26]$$

5. IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO

5.1. Introdução

Neste capítulo é descrita a implementação do modelo apresentado no capítulo anterior que tem como objetivo a determinação ótima dos horários de carga e descarga de veículos numa mina subterrânea, bem como a definição ótima da localização de escapatórias para cruzamento de veículos.

Para a implementação deste modelo optou-se pela utilização do Microsoft Excel por ser uma ferramenta gratuita, com um interface intuitivo de fácil uso, que permite tirar proveito da grande capacidade de cálculo e manipulação de dados. Foi também utilizado um suplemento do Microsoft Excel, o Solver, que pode ser utilizado para resolver problemas de otimização lineares e não-lineares. O Solver é considerado uma ferramenta de análise hipotética, que possibilita encontrar um valor ideal otimizado para uma determinada equação.

A implementação do modelo ocorreu em três etapas:

- *Variáveis de decisão* representam valores desconhecidos referentes ao problema proposto. No Microsoft Excel são definidas em células que poderão ser alteradas até que seja atingida a otimização. A determinação destas variáveis de decisão está diretamente relacionada com as restrições do modelo. Por norma estas variáveis serão sempre valores positivos pelo que remete à necessidade de também expressar as restrições de não negatividade;
- *Função objetivo* define a otimização desejada pelo objetivo do problema (maximizar ou minimizar);
- *Restrições* definem as limitações a que o problema é sujeito. Cada restrição é elaborada numa relação linear com as variáveis de decisão, estando estas muitas vezes sujeitas a uma ou mais limitações.

O Solver está limitado na dimensão dos problemas que permite resolver, não podendo lidar com problemas com mais de 200 variáveis de decisão e 200 restrições. Para o problema em causa isto representa uma grande limitação dado que, como se verá posteriormente, a sua dimensão cresce exponencialmente com o número de veículos, viagens e número de escapatórias a considerar. Para ultrapassar esse problema poderá recorrer-se ao Solver pro ou a outros *softwares* de resolução de problemas de programação linear, inteira ou mista, não sujeitos a limitações de dimensão dos problemas.

Para uma melhor perceção da dimensão do problema construído na folha de cálculo, realizou-se um pequeno estudo em função das suas características, no que diz respeito ao número máximo de variáveis de decisão e de restrições viáveis para a construção do modelo. As tabelas representadas em baixo, foram concebidas para o estudo da dimensão do modelo, determinam o número de restrições e de variáveis de decisão introduzidas na folha de cálculo. Através da variação do número de pontos de paragem, de veículos e de viagens é possível observar o aumento da dimensão do problema.

Tabela 5.1. Estudo da dimensão do problema.

Número de variáveis				Número de variáveis																																																																					
Pontos de paragem	3	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Número de restrições</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Restrição 4.2</td><td>1</td></tr> <tr><td>Restrição 4.3</td><td>2</td></tr> <tr><td>Restrição 4.4</td><td>12</td></tr> <tr><td>Restrição 4.5</td><td>12</td></tr> <tr><td>Restrição 4.6</td><td>10</td></tr> <tr><td>Restrição 4.7</td><td>10</td></tr> <tr><td>Restrição 4.8</td><td>5</td></tr> <tr><td>Restrição 4.9</td><td>12</td></tr> <tr><td>Restrição 4.10</td><td>6</td></tr> <tr><td>Restrição 4.11</td><td>4</td></tr> <tr><td>Restrição 4.12</td><td>6</td></tr> <tr><td>Restrição 4.13</td><td>6</td></tr> <tr><td>Restrição 4.14</td><td>5</td></tr> <tr><td>Restrição 4.19</td><td>5</td></tr> <tr><td>Restrição 4.20</td><td>4</td></tr> <tr> <td>Total de restrições</td> <td>100</td> </tr> </tbody> </table>		Número de restrições		Restrição 4.2	1	Restrição 4.3	2	Restrição 4.4	12	Restrição 4.5	12	Restrição 4.6	10	Restrição 4.7	10	Restrição 4.8	5	Restrição 4.9	12	Restrição 4.10	6	Restrição 4.11	4	Restrição 4.12	6	Restrição 4.13	6	Restrição 4.14	5	Restrição 4.19	5	Restrição 4.20	4	Total de restrições	100	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Número de restrições</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Restrição 4.2</td><td>1</td></tr> <tr><td>Restrição 4.3</td><td>3</td></tr> <tr><td>Restrição 4.4</td><td>27</td></tr> <tr><td>Restrição 4.5</td><td>27</td></tr> <tr><td>Restrição 4.6</td><td>24</td></tr> <tr><td>Restrição 4.7</td><td>24</td></tr> <tr><td>Restrição 4.8</td><td>16</td></tr> <tr><td>Restrição 4.9</td><td>27</td></tr> <tr><td>Restrição 4.10</td><td>18</td></tr> <tr><td>Restrição 4.11</td><td>6</td></tr> <tr><td>Restrição 4.12</td><td>9</td></tr> <tr><td>Restrição 4.13</td><td>9</td></tr> <tr><td>Restrição 4.14</td><td>8</td></tr> <tr><td>Restrição 4.19</td><td>16</td></tr> <tr><td>Restrição 4.20</td><td>14</td></tr> <tr> <td>Total de restrições</td> <td>229</td> </tr> </tbody> </table>		Número de restrições		Restrição 4.2	1	Restrição 4.3	3	Restrição 4.4	27	Restrição 4.5	27	Restrição 4.6	24	Restrição 4.7	24	Restrição 4.8	16	Restrição 4.9	27	Restrição 4.10	18	Restrição 4.11	6	Restrição 4.12	9	Restrição 4.13	9	Restrição 4.14	8	Restrição 4.19	16	Restrição 4.20	14	Total de restrições	229
Número de restrições																																																																									
Restrição 4.2	1																																																																								
Restrição 4.3	2																																																																								
Restrição 4.4	12																																																																								
Restrição 4.5	12																																																																								
Restrição 4.6	10																																																																								
Restrição 4.7	10																																																																								
Restrição 4.8	5																																																																								
Restrição 4.9	12																																																																								
Restrição 4.10	6																																																																								
Restrição 4.11	4																																																																								
Restrição 4.12	6																																																																								
Restrição 4.13	6																																																																								
Restrição 4.14	5																																																																								
Restrição 4.19	5																																																																								
Restrição 4.20	4																																																																								
Total de restrições	100																																																																								
Número de restrições																																																																									
Restrição 4.2	1																																																																								
Restrição 4.3	3																																																																								
Restrição 4.4	27																																																																								
Restrição 4.5	27																																																																								
Restrição 4.6	24																																																																								
Restrição 4.7	24																																																																								
Restrição 4.8	16																																																																								
Restrição 4.9	27																																																																								
Restrição 4.10	18																																																																								
Restrição 4.11	6																																																																								
Restrição 4.12	9																																																																								
Restrição 4.13	9																																																																								
Restrição 4.14	8																																																																								
Restrição 4.19	16																																																																								
Restrição 4.20	14																																																																								
Total de restrições	229																																																																								
Número de viagens	6	Pontos de paragem	4																																																																						
Número de veículos	2	Número de viagens	9																																																																						
Total de variáveis	67	Número de veículos	3																																																																						
		Total de variáveis	137																																																																						

Aplicando o estudo de dimensão do problema ao modelo construído na folha de cálculo, como se pode observar nas Tabela 5.1, respeitante à coluna situada mais à esquerda, obteve-se um total de 67 variáveis de decisão e 100 restrições. Aumentando o número de escapatórias para duas e acrescentando mais um veículo à frota, tal implica a realização de mais três viagens, o número de variáveis e de restrições aumenta substancialmente, como se pode observar nas Tabela 5.1 colocadas à direita.

A elaboração do estudo da dimensão do problema demonstra que para um possível cenário mais complexo, com duas escapatórias e três veículos, a aplicação do modelo à folha de cálculo com uso do Excel Solver não é viável, uma vez que este apenas admite um total de 200 restrições e 200 variáveis de decisão. Fazendo variar os parâmetros isoladamente é possível perceber que tal como era expectável, a variação dos pontos de paragem é o parâmetro com maior impacto no aumento do número de restrições e de variáveis de decisão, como pode ser analisado no Gráfico 5.1 onde se fixaram os valores do número de veículos em 2 e do número de viagens em 6.

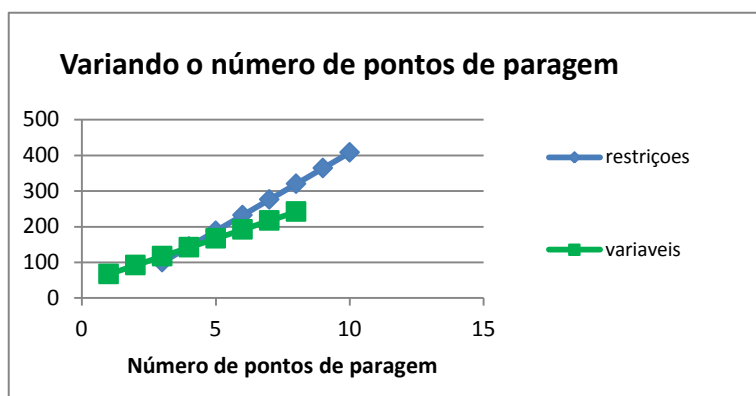


Gráfico 5.1. Variação do número de pontos de paragem.

O parâmetro de variação do número de viagens tem um impacto menos significativo na dimensão do problema, quando comparado com o parâmetro de variação do número de pontos de paragem, sendo para este caso quase o dobro das restrições e das variáveis de decisão como se pode observar nos Gráfico 5.1 e Gráfico 5.2

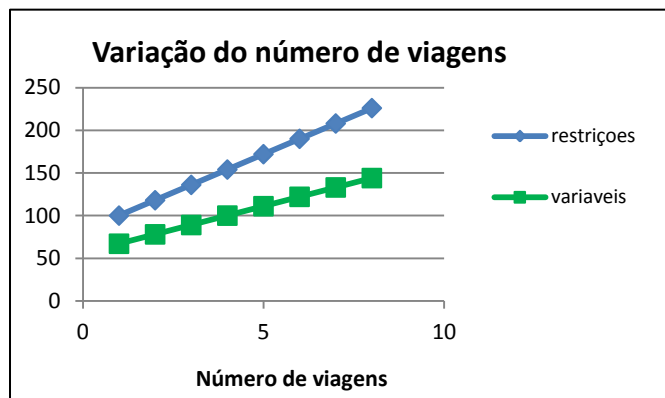


Gráfico 5.2. Variação do número de viagens.

A variação do número de veículos, analisada através do Gráfico 5.3 onde os parâmetros do número de viagens e do número de localizações foram fixados em 6 e 3 respetivamente, demonstrou ser o parâmetro de menor relevo na dimensão da folha de cálculo, uma vez que o número de veículos não influencia o número de variáveis de decisão, irá fazer variar em menor escala o número de restrições.

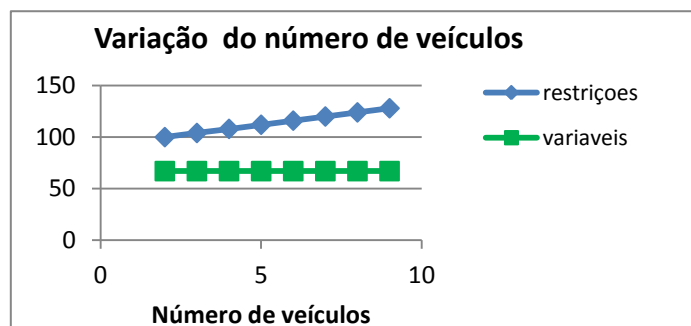


Gráfico 5.3. Variação do número de veículos.

5.2. Modelo de otimização no Excel

A construção da folha de cálculo para uma primeira abordagem ao modelo matemático, apresentado no capítulo anterior, foi desenvolvida para uma mina de rampa simples, com um único carregador, uma escapatória, velocidades de descida e subida constantes, tal como os tempos de carga e descarga. Na Figura 5.1 é apresentada a folha de cálculo elaborada para testar o modelo matemático.

O modelo de otimização no Excel foi definido em quatro fases distintas:

○ Tabela de parâmetros:

A primeira fase de construção da folha de cálculo passou pela elaboração de uma tabela de parâmetros com as características do problema testado, representada nas células a verde.

○ Células variáveis :

Nas células variáveis são introduzidas as diferentes variáveis de decisão, cada uma delas representada na Figura 5.1 com uma cor distinta.

As células a cor-de-rosa representam o comprimento do segmento entre localizações.

A cinzento está representada a tabela de variáveis de decisão referente aos horários de partida e chegada da viagem j do local l na direção do carregador e na direção da superfície.

O tempo de espera da viagem j no carregador está assinalado nas células cor-de-rosa escuro.

○ Célula destino, onde será introduzida a função objetivo:

A função objetivo representada pela cor amarela.

○ Restrições:

Na folha de cálculo foram introduzidas as restrições representadas na Figura 5.1 na cor azul-escuro e diferenciadas pelo número da sua respetiva equação definidas no modelo matemático apresentado no capítulo anterior.

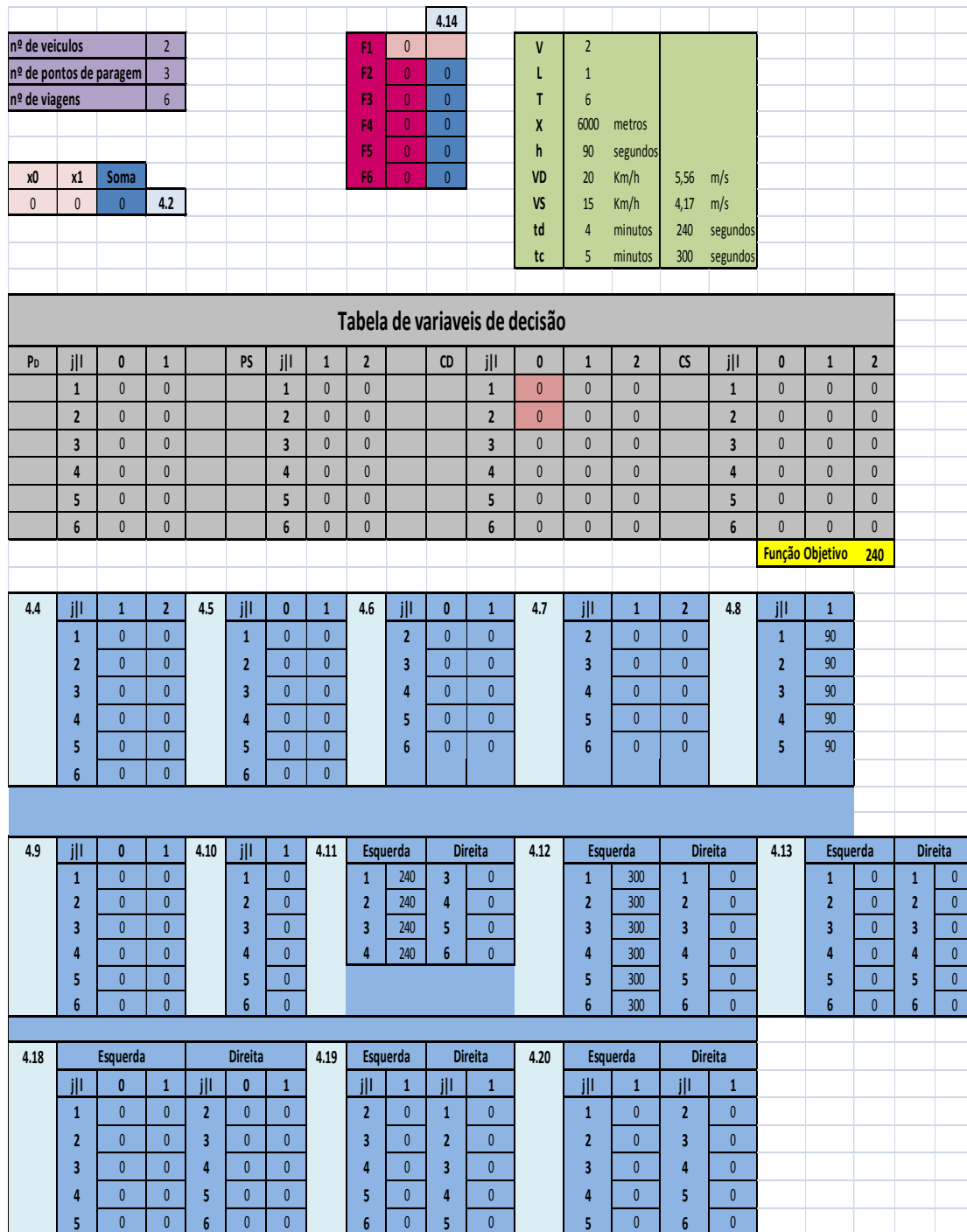


Figura 5.1. Esquema da folha de cálculo.

O problema de otimização é descrito na caixa de diálogo de *Parâmetros do Solver* como demonstrado na Figura 5.2.

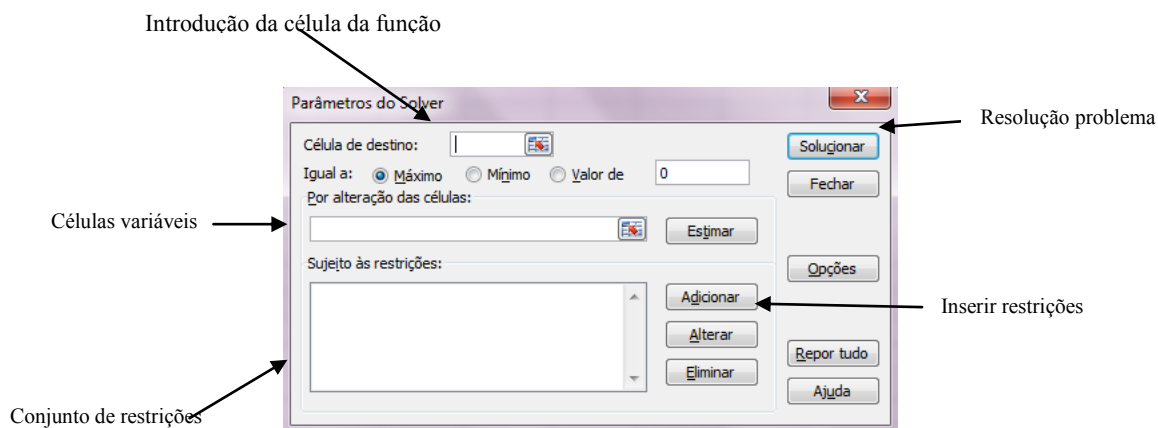


Figura 5.2. Caixa de diálogo de parâmetros do solver.

Selecionou-se a célula destino (onde é colocada a função objetivo) e executou-se a ferramenta Solver para a definir, e definir o tipo de otimização, neste caso minimizar a função objetivo.

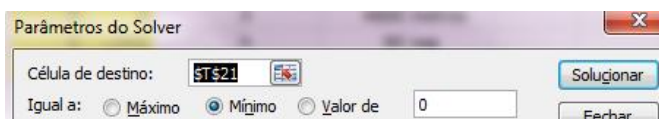


Figura 5.3. Introdução da célula destino.

Depois de selecionada a célula destino introduziu-se as células variáveis.

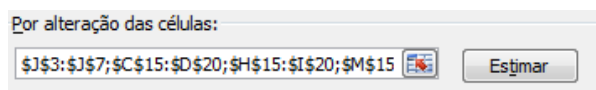


Figura 5.4. Introdução de células variáveis.

De seguida introduziram-se todas as restrições:

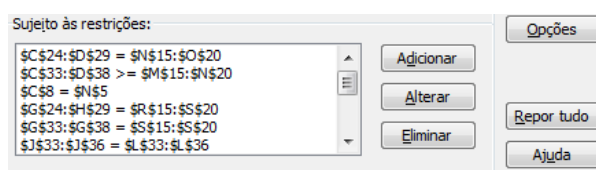


Figura 5.5. Introdução das restrições.

Ainda na ferramenta do Solver, nas *Opções do Solver*, assumiu-se não negativos para atender às restrições de não negatividade e também a um modelo linear.

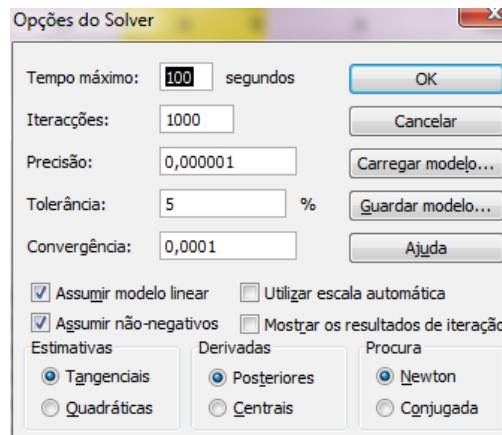


Figura 5.6. Opções do solver.

A figura seguinte demonstra todo o modelo construído na caixa de ferramentas do Solver.

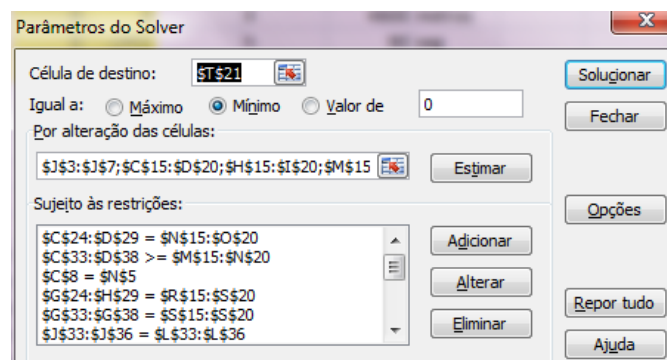


Figura 5.7. Modelo construído no solver.

6. RESULTADOS DO MODELO MATEMÁTICO

Nos capítulos anteriores foi descrito o modelo matemático e o desenvolvimento da folha de cálculo para o movimento de veículos no interior de uma mina subterrânea, para um número específico de escapatórias e de veículos. Neste capítulo serão apresentados os resultados da aplicação da folha de cálculo.

Na fase inicial de construção do modelo foi considerada uma mina com uma única descida, um único carregador e apenas uma escapatória. Nesta primeira fase a construção do modelo foi efetuada com velocidades de descida e subida constante.

O modelo foi testado em três cenários distintos descritos ao longo deste capítulo, de forma a encontrar o que melhor minimiza o tempo total necessário para efetuar um determinado número de viagens. Nos três cenários foram introduzidas todas as restrições de igual forma, à exceção das referentes a *veículos em sentidos opostos no mesmo segmento*, que diferenciam os três cenários.

Para a criação dos três cenários foram usados os seguintes parâmetros:

Tabela 6.1. Tabela de parâmetros.

V (nº de veículos)	2
L (nº de escapatórias)	1
T (nº de viagens a realizar)	6
X (tamanho da descida)	2000 Metros
h (tempo de segurança)	90 Segundos
V ^D (velocidade descida)	20 Km/h
V ^S (velocidade subida)	15 Km/h

6.1. Cenário 1

Na construção do primeiro cenário foram introduzidos os parâmetros de tempos de carga e descarga iguais.

Tabela 6.2. Parâmetros de tempo de carga e descarga.

t_d (tempo de descarga)	10 Minutos
t_c (tempo de carga)	10 Minutos

As restrições introduzidas além das comuns aos três cenários foram as [4.19] e [4.20].

Neste cenário, o modelo otimizou o posicionamento da escapatória numa posição equidistante como se pode observar na Tabela 6.3. Sempre que os parâmetros de tempo de carga e descarga arbitrados assumam o mesmo valor, o modelo matemático para este caso de estudo, com apenas uma escapatória e dois veículos, assumirá que o posicionamento ótimo das escapatórias é equidistante, como se pode observar na Tabela 6.4.

Tabela 6.3. Tabela referente ao comprimento dos segmentos da rampa.

X_0	X_1	Soma
1000	1000	2000

Na Tabela 6.3 referente ao comprimento dos segmentos da rampa, x_0 corresponde ao segmento entre a superfície e a escapatória e x_1 ao segmento entre a escapatória e o carregador, retirada da folha de cálculo.

Tabela 6.4. Tabela da influência dos tempos de carga e descarga.

Tc igual a Td	Função Objetivo	x0
4	4620	1000
5	5040	1000
6	5460	1000
7	5880	1000
8	6300	1000
9	6720	1000
10	7140	1000
11	7560	1000
12	7980	1000
13	8400	1000
14	8820	1000
15	9240	1000
16	9660	1000
17	10080	1000
18	10500	1000
19	10920	1000
20	11340	1000

O movimento dos veículos dentro da mina subterrânea neste primeiro cenário é descrito pelo Gráfico 6.1 produzido pelo modelo de Excel. O Gráfico 6.1 demonstra o movimento de dois veículos que realizam três viagens cada um. O eixo vertical representa as localizações, sendo 0 a superfície da mina, 1 a escapatória e 2 o carregador. O eixo horizontal corresponde ao tempo. Os dois veículos são representados com cores distintas, e cada viagem com uma cor diferente.

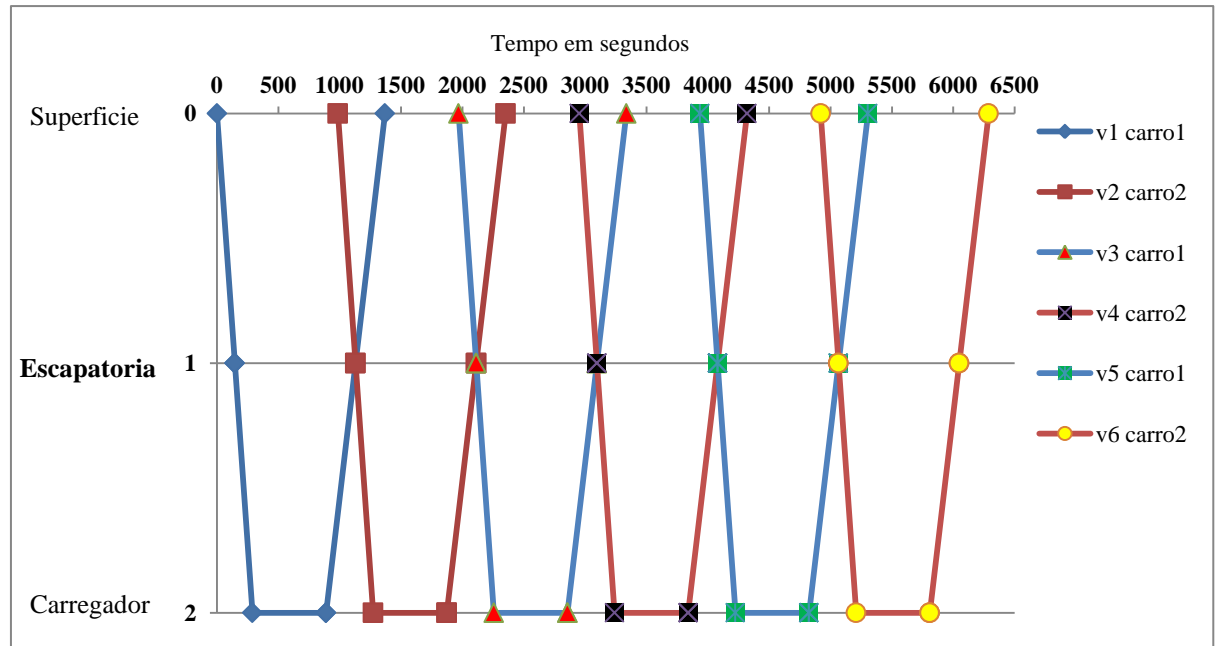


Gráfico 6.1. Gráfico da simulação do primeiro cenário.

Como pode ser observado no Gráfico 6.1 o modelo funciona corretamente, não havendo cruzamentos fora da escapatória. Neste primeiro cenário não existem veículos retidos na escapatória ou na fila de espera do carregador. Os veículos descendentes apenas utilizam momentaneamente a escapatória para ceder passagem ao veículo em sentido ascendente. O cenário 1 otimiza a localização da escapatória considerando que se as escapatórias estiverem colocadas muito afastadas entre si, os veículos descendentes não se podem intercalar com os veículos ascendentes e se colocadas muito perto, os veículos descendentes irão ter muito tempo de espera na escapatória para que o veículo ascendente passe.

A Tabela 6.5 permite aferir a duração de cada viagem em cada segmento, na escapatória e no carregador.

Tabela 6.5. Tabela de resultados obtidos nas células variáveis do cenário 1, retirada da folha de cálculo.

		V1 carro1	V2 carro2	V3 carro1	V4 carro2	V5 carro1	V6 carro2
Superfície	0	0,00	1020,00	2040,00	3060,00	4080,00	5100,00
Chegada á escapatória	1	180,00	1200,00	2220,00	3240,00	4260,00	5280,00
Partida da escapatória	1	180,00	1200,00	2220,00	3240,00	4260,00	5280,00
Chegada ao carregador	2	360,00	1380,00	2400,00	3420,00	4440,00	5460,00
Pronto a partir	2	960,00	1980,00	3000,00	4020,00	5040,00	6060,00
Parte carregado	2	960,00	1980,00	3000,00	4020,00	5040,00	6060,00
Chegada á escapatória	1	1200,00	2220,00	3240,00	4260,00	5280,00	6300,00
Partida da escapatória	1	1200,00	2220,00	3240,00	4260,00	5280,00	6300,00
Superfície	0	1440,00	2460,00	3480,00	4500,00	5520,00	6540,00

Para este cenário a função objetivo toma o seguinte valor:

Tabela 6.6. Valor da função objetivo, para o primeiro cenário.

Função objetivo	7140
-----------------	------

6.2. Cenário 2

A simulação do segundo cenário decorre com as mesmas restrições do primeiro, com alteração dos parâmetros de tempos de carga e descarga.

Tabela 6.7. Tabela de parâmetros do tempo de carga e descarga usados no segundo cenário.

t_d (tempo de descarga)	5 Minutos
t_c (tempo de carga)	10 Minutos

Para este caso de estudo a otimização do espaçamento da escapatória com diferentes tempos de carga e descarga é dada com os valores da seguinte Tabela 6.8. Neste caso o posicionamento das escapatórias deixa de ser equidistante.

Tabela 6.8. Tabela relativa ao comprimento dos segmentos da rampa do cenário dois.

X_0	X_1	Soma
1357	643	2000

Os resultados obtidos para a construção da Tabela 6.9 permitiram o estudo da influência do parâmetro de tempo de carga e descarga no tipo de espaçamento entre escapatórias e conseqüentemente na boa fluência dos veículos no interior de uma mina, possível de ser analisado através da comparação dos resultados da função objetivo.

Tabela 6.9. Tabela da influência dos tempos de carga e descarga.

Tempo de Descarga	Tempo de Carga	Função Objetivo	x0
4	4	4620	1000
4	5	4830	1071
4	6	5040	1143
4	7	5250	1214
4	8	5460	1286
4	9	5670	1357
4	10	5880	1429
4	11	6090	1500
4	12	6300	1571
4	13	6510	1643
4	14	6720	1714
4	15	6930	1786
4	16	7140	1857
4	17	7350	1929
4	18	7560	2000
4	19	7920	2000
4	20	8280	2000

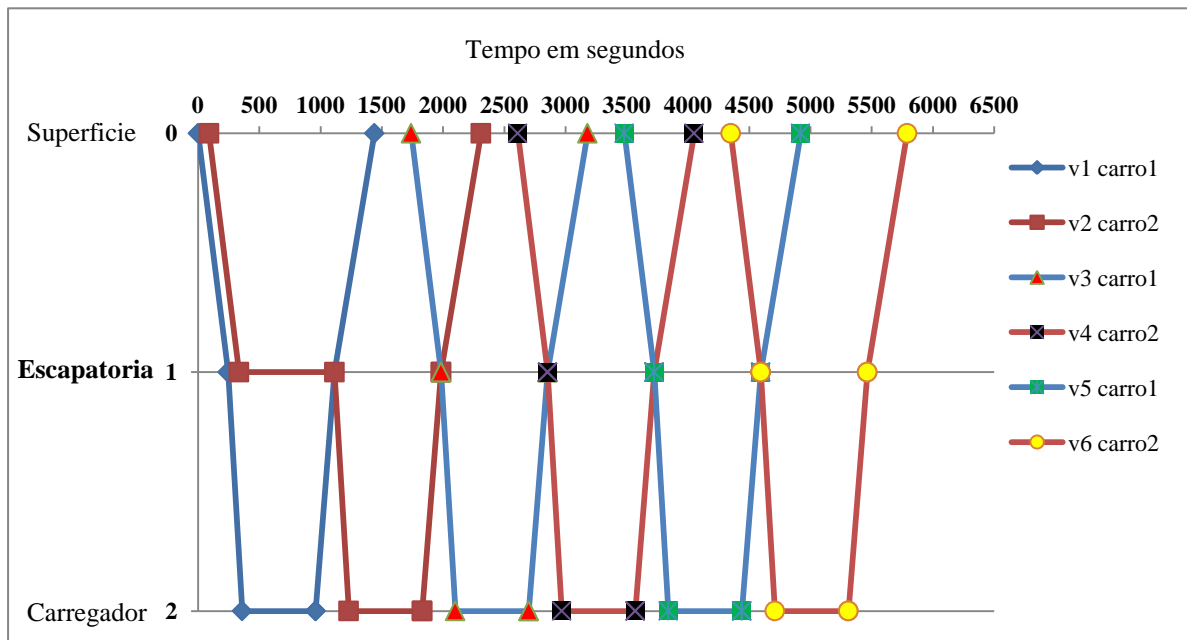


Gráfico 6.2. Gráfico obtido para o segundo cenário.

O Gráfico 6.2 demonstra o movimento de dois veículos que realizam três viagens cada um. O eixo vertical representa as localizações, sendo 0 a superfície da mina, 1 a escapatória e 2 o carregador. O eixo horizontal corresponde ao tempo. Os dois veículos são representados em cores diferentes, e cada viagem com uma cor distinta. O carro dois na sua primeira viagem fica retido na escapatória durante 780 segundo, e isto acontece porque a partida do segundo carro não está otimizada de forma a considerar o menor tempo possível do veículo retido na escapatória.

Tabela 6.10. Tabela dos tempos de espera na escapatória, obtidos na simulação da folha de cálculo.

Tempo de espera na escapatória	
Viagem 1	0
Viagem 2	780
Viagem 3	0
Viagem 4	0
Viagem 5	0
Viagem 6	0

Na tabela seguinte são apresentados todos os tempos necessários à construção do gráfico 2, segundo os resultados obtidos da simulação.

Tabela 6.11. Tabela de resultados obtidos nas células variáveis, retirada da folha de cálculo.

		V ₁ carro 1	V ₂ carro 2	V ₃ carro 1	V ₄ carro 2	V ₅ carro 1	V ₆ carro 2
Superfície	0	0	90	1740	2610	3480	4350
Chegada á escapatória	1	244	334	1984	2854	3724	4594
Partida da escapatória	1	244,28571	1114,28571	1984,2857	2854,2857	3724,2857	4594,286
Chegada ao carregador	2	360	1230	2100	2970	3840	4710
Pronto a partir	2	960	1830	2700	3570	4440	5310
Parte carregado	2	960	1830	2700	3570	4440	5310
Chegada á escapatória	1	1114	1984	2854	3724	4594	5464
Partida da escapatória	1	1114	1984	2854	3724	4594	5464
Superfície	0	1440	2310	3180	4050	4920	5790

Neste segundo cenário a função objetivo toma o seguinte valor:

Tabela 6.12. Tabela do resultado da função objetivo relativa ao segundo cenário.

Função objetivo	6090
-----------------	------

Numa breve comparação, correndo de novo o cenário 2 e considerando as mesmas restrições e os mesmos parâmetros de tempos de carga e descarga, é possível observar que quer no exemplo acima descrito, em que a otimização do processo não considera o menor tempo possível de espera na escapatória para a viagem v_2 do carro 2, assim como na nova corrida do modelo em que está a ser considerado o menor tempo de espera dos veículos nas escapatórias, o resultado da função objetivo permanece igual, como é possível observar-se na Tabela 6.14. As alterações sofridas são ao nível dos tempos de saída dos veículos da superfície para uma nova viagem, limitando assim o tempo de espera nas escapatórias como se pode verificar na Tabela 6.13.

Tabela 6.13. Tabela do resultado obtidos nas células variáveis, retirada da folha de cálculo.

		V1 carro1	V2 carro2	V3 carro1	V4 carro2	V5 carro1	V6 carro2
Superfície	0	0	870	1740	2610	3480	4350
Chegada á escapatória	1	244	1114	1984	2854	3724	4594
Partida da escapatória	1	244,28571	1114,28571	1984,2857	2854,2857	3724,2857	4594,286
Chegada ao carregador	2	360	1230	2100	2970	3840	4710
Pronto a partir	2	960	1830	2700	3570	4440	5310
Parte carregado	2	960	1830	2700	3570	4440	5310
Chegada á escapatória	1	1114	1984	2854	3724	4594	5464
Partida da escapatória	1	1114	1984	2854	3724	4594	5464
Superfície	0	1440	2310	3180	4050	4920	5790

No Gráfico 6.3 é representado o movimento das viagens de toda a frota de veículos. O eixo vertical representa as localizações, sendo 0 a superfície da mina, 1 a escapatória e 2 o carregador. O eixo horizontal corresponde ao tempo. Os dois veículos são representados em cores diferentes, e cada viagem com uma cor distinta. Pode-se observar que no interior da mina subterrânea o único ponto de cruzamento efetuado pelos veículos é na escapatória. Nesta corrida do modelo pode ainda denotar-se no gráfico que os veículos

apenas efetuam um breve desvio de cedência de passagem aos veículos em sentido ascendente na escapatória.

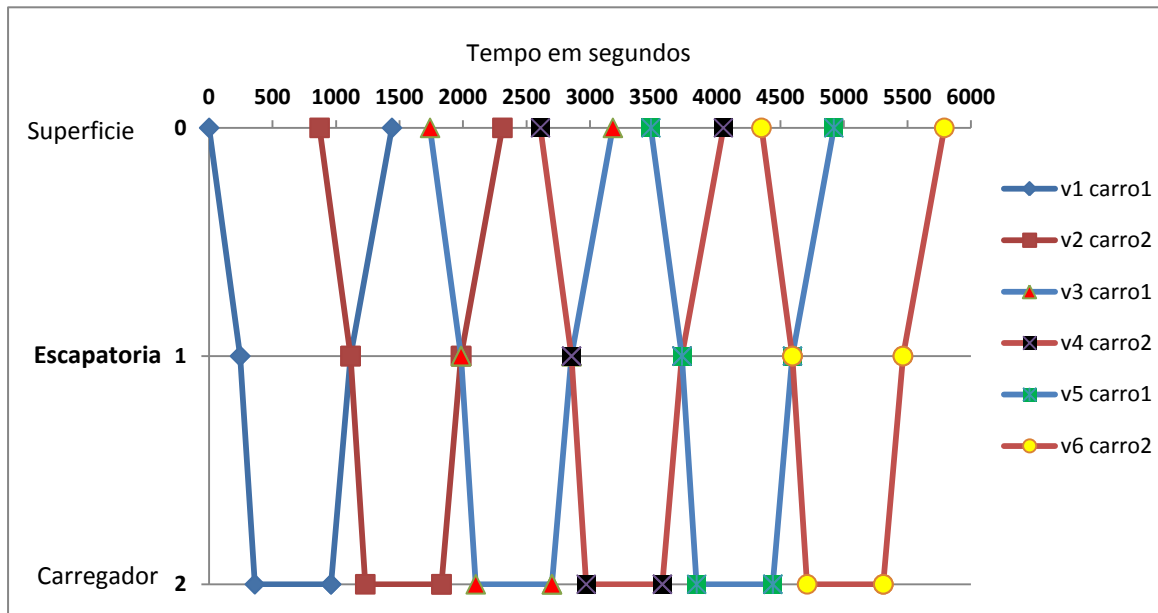


Gráfico 6.3. Gráfico obtido na simulação do segundo cenário 2.

Nesta segunda corrida do cenário 2 a função objetivo apresenta o seguinte valor:

Tabela 6.14. Tabela do resultado da função objetivo relativa ao segundo cenário.

Função objetivo	6090
-----------------	------

6.3. Cenário 3

Neste último caso de estudo foram usados os mesmos parâmetros dos cenários anteriores e as restrições comuns aos três.

Com a introdução dos seguintes parâmetros de tempos de carga e descarga:

Tabela 6.15. Tabela de parâmetros do tempo de carga e descarga usados no terceiro cenário.

t_d (tempo de descarga)	5 Minutos
t_c (tempo de carga)	10 Minutos

Para este cenário foi introduzida a restrição [4.18] que obriga a viagem j , na direção do carregador, a partir da localização l depois da viagem j' , na direção da superfície, ter chegado.

Como se pode observar no Gráfico 6.4, com a nova restrição todos os veículos apenas retornam ao interior da mina para uma nova viagem depois do veículo anterior ter concluído a sua viagem.

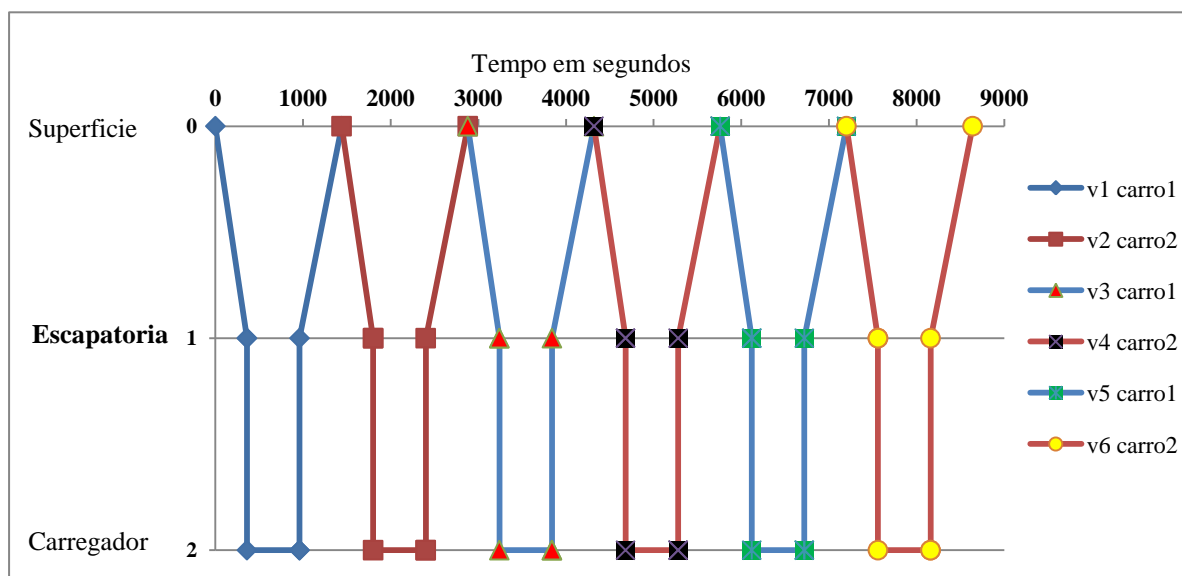


Gráfico 6.4. Gráfico referente ao cenário 3.

É de realçar que tal como se pode observar no Gráfico 6.4, neste cenário como circula um veículo de cada vez no interior da mina, não existe otimização da escapatória, porque é descartada a necessidade de paragem do veículo, uma vez que a possibilidade de ocorrer conflito é inexistente.

Tabela 6.16. Tabela do comprimento dos segmentos da rampa para o terceiro cenário.

X ₀	X ₁	Soma
2000	0	2000

Tabela 6.17. Tabela de resultados obtidos nas células variáveis, retirada da folha de cálculo.

		V1 carro1	V2 carro2	V3 carro1	V4 carro2	V5 carro1	V6 carro2
Superfície	0	0	1440	2880	4320	5760	7200
Escapatória chega	1	360	1800	3240	4680	6120	7560
Escapatória partida	1	360	1800	3240	4680	6120	7560
Carregador chega	2	360	1800	3240	4680	6120	7560
Carregador pronto	2	960	2400	3840	5280	6720	8160
Carregador parte	2	960	2400	3840	5280	6720	8160
Escapatória	1	960	2400	3840	5280	6720	8160
Superfície	0	1440	2880	4320	5760	7200	8640

A função objetivo para este terceiro cenário toma o seguinte valor:

Tabela 6.18. Tabela do resultado da função objetivo relativa ao segundo cenário.

Função objetivo	8940
-----------------	------

6.4. Conclusão

Como foi observado ao longo deste capítulo o espaçamento das escapatórias é bastante importante para a otimização da produção de uma mina subterrânea. A otimização da localização das escapatórias como pode ser observada nos cenários apresentados anteriormente está diretamente relacionada com a variação dos tempos de carga e descarga. A variância destes tempos tem igualmente grande influência nos resultados da função objetivo.

No primeiro cenário em que os tempos de carga e descarga são iguais, as escapatórias são introduzidas em períodos equidistantes. A função objetivo, que representa o tempo total para realizar um dado número de viagens é bastante superior no cenário 1 quando comparada com o cenário 2, onde os tempos de carga e descarga são distintos e as escapatórias não sendo equidistantes são introduzidas na sua melhor otimização. No cenário 3 com a alteração das restrições, deixa de existir o posicionamento ótimo da escapatória e os veículos são obrigados a iniciar a sua viagem depois do regresso do que lhe precede. Esta restrição leva a um enorme aumento da função objetivo como se pode observar na Tabela 6.19.

Tabela 6.19. Tabela do comprimento dos segmentos da rampa.

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Função objetivo	7140	6090	8940

Como se pode analisar na Tabela 6.19, no cenário 2 o tempo total para os dois veículos concluírem as três viagens cada um, é de 6090 segundos. O segundo cenário é mais rápido 1050 segundos que o primeiro e 2850 segundos mais rápido que o terceiro, concluindo-se por conseguinte que é o cenário mais produtivo para este caso de estudo.

7. CONCLUSÃO

O transporte no interior de minas subterrâneas é efetuado com caminhões que operam em rampas estreitas, ao longo das quais existem escapatórias que permitem a passagem de veículos em sentidos opostos, mesmo que ocorra em simultâneo. A localização das escapatórias tem um impacto significativo sobre os tempos de viagem de cada caminhão e conseqüentemente sobre a produtividade da mina. A melhor localização da escapatória é aquela que permite ao veículo não aguardar um tempo exacerbado na mesma.

A produtividade de uma mina depende de diversos fatores tais como:

- Tamanho da rampa;
- Velocidade ascendente e descendente dos caminhões;
- Número de escapatórias;
- Localização das escapatórias;
- Número de veículos;
- Tempo de carga e descarga.

Na literatura, a otimização dos espaçamentos de escapatórias não é um tema ainda muito pesquisado, sendo mais frequente o estudo da simulação do movimento de veículos no interior de minas subterrâneas.

A presente dissertação constitui o início de um passo significativo para a melhoria da gestão de tráfego e produtividade de uma mina subterrânea. Este caso de estudo investiga a otimização do espaçamento das escapatórias e a melhor sequência de movimento dos veículos de forma a minimizar o tempo necessário para que uma dada frota de caminhões efetue um dado número de viagens.

Minimizando o tempo necessário para realizar um dado número de viagens, aumentamos o número de viagens possíveis de realizar por turno, o que leva

consequentemente a um aumento de extração de minério para a superfície da mina por dia de trabalho, aumentando a produtividade.

O modelo da folha de cálculo foi testado para comparar a produtividade da mina com alguns cenários distintos:

- Escapatórias equidistantes;
- Escapatórias ótimas;
- Sem escapatória.

Como era expectável a função objetivo aumenta com a ampliação dos tempos de carga e descarga. É ainda verificado que com um substancial aumento do tempo de carga ou descarga, o modelo da folha de cálculo deixe de considerar necessário a existência de uma escapatória, pois todos os cruzamentos irão ocorrer á superfície ou no local do carregador.

A principal contribuição da pesquisa descrita nesta dissertação é a aplicação de um modelo matemático PIM no Excel, que otimiza a localização da escapatória e o correspondente horário de viagens da frota de veículos.

A aplicação criada não resolve todos os problemas mas fornece um forte ponto de partida para a criação de uma ferramenta mais profissional, automatizada e completa.

7.1. Aspectos possíveis de melhorar no futuro

Um dos aspectos possível de ser melhorado é o desenvolvimento de um método mais rico e interativo, que permita uma introdução mais fácil e automática para diferentes números de veículos e de escapatórias. Uma automatização da folha de cálculo que permita analisar os diferentes padrões de movimento de forma mais eficiente para diversos cenários.

7.2. Dificuldades durante o desenvolvimento

O primeiro obstáculo com o qual me deparei na elaboração da presente dissertação foi a dificuldade inerente ao reduzido número de artigos relacionados com o tema abordado, porém a dificuldade mais relevante prendeu-se com a construção do modelo na folha de cálculo.

Numa fase inicial, com base na literatura existente sobre o tema, recorreu-se a outros métodos para a realização do caso de estudo, porém a complexidade requerida e atendendo ao tempo disponível para a elaboração da dissertação, não se tornava viável o uso da simulação, recorrendo-se assim ao modelo matemático, cuja construção no Microsoft Excel permitiu aferir os resultados de uma forma mais rápida e concisa.

O modelo teria de cumprir imperativamente uma série de restrições para que o resultado final fosse o mais fidedigno possível. A dificuldade na introdução dessas restrições passa pelas limitações que a folha de cálculo apresenta relativamente ao número limitado de variáveis e de restrições.

O desenvolvimento deste modelo e a sua otimização constitui material para elaboração de trabalhos futuros.

8. BIBLIOGRAFIA

1. *Planing for flexibility in underground mine production systems.* **Kazakidis, V.N. e Scoble, M.** Novembro de 2003.
2. *Using aggregation to optimize long-term production planing at an underground mine.* **Newman, M. Alexandra e Kutchta, Mark.** 2004, European Jornal of Operational Research, Vol. 176, pp. 1205-1218.
3. *Modeling two-way traffic flow in an underground one-way decline.* **Sturgul, J.R., Jacobsen, W.L. e Tecsá, T.L.** São Paulo, Brazil : s.n., 1996. In Proceedings of the Fifth International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection.
4. **Roberts, B. H.** Computer simulation of underground truck haulage operations. *Mining Technology.* 2002, Vol. 111, 2, pp. 123-128.
5. **Anjomshoa, H., et al.** Passing bays in an underground mine. *Mining Technology.* 2010, Vol. 119, 1.
6. **Anjomshoa, H.** *Optimal placement of passing bays in underground mines.* University of South Australia : s.n., 2011.
7. **Figueiredo, José Pedro.** *Gestão de tráfego ferroviário.* Universidade Técnica de Lisboa. 2007. Resolução de conflitos em linhas de baixo tráfego.