



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Desenvolvimento de um simulador para a gestão de tráfego em minas subterrâneas

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

Autor

Mariline Rodrigues Domingues

Orientador

Cristóvão Silva

Júri

Presidente Professor Doutora Maria Augusta Neto
Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra

Vogais Professora Doutora Marta Cristina Cardoso de Oliveira
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Orientador Professor Doutor Cristóvão Silva
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Coimbra, julho, 2014

“O verdadeiro Homem mede a sua força, quando se defronta com o obstáculo.”

Antoine de Saint-Exupéry.

Aos meus pais.

Agradecimentos

A realização desta dissertação teria sido muito difícil de concretizar sem a colaboração de muitas pessoas a quem gostaria de agradecer.

Ao professor doutor Cristóvão Silva, orientador desta dissertação, pelo apoio, disponibilidade e orientação que manifestou durante a realização do trabalho. Sem a sua contribuição não teria sido possível.

Aos meus pais pelo esforço que fizeram para me darem esta oportunidade e pelo apoio incondicional ao longo deste percurso. É a eles que devo tudo aquilo que consegui alcançar.

Aos meus irmãos e à minha avó pela força, ajuda e compreensão que sempre tiveram comigo, principalmente nos momentos menos bons da minha vida.

Aos meus tios, Anabel e Marcelo, e à minha prima Joana, pela força, pelo incentivo e pela paciência que sempre demonstraram comigo.

Aos meus amigos que me acompanharam ao longo da minha vida universitária, pelo apoio, incentivo e por todos os momentos que partilhámos. Sem dúvida que foram muito importantes para que hoje tenha conseguido alcançar esta fase.

E por fim, um agradecimento muito especial ao João Ferreira pelo enorme apoio que me deu. O seu incentivo foi essencial para que conseguisse terminar esta etapa.

Resumo

Portugal é considerado um país mineiro, como tal é importante explorar esse potencial em prol do país. É um setor que acarreta avultados custos na sua atividade, nomeadamente em investigação, e que obtém receitas satisfatórias, pelo que se torna essencial estudar o funcionamento das minas. Esse estudo tem como objetivo aumentar o número de viagens realizadas por cada veículo de transporte durante um dia de trabalho, ou seja, aumentar a produtividade das minas.

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um simulador para a gestão de tráfego em minas subterrâneas. Isto é, criou-se um simulador para modelar o movimento dos veículos de transporte, nomeadamente, camiões, em minas subterrâneas. Para isso, utilizou-se o Excel e recorreu-se ao *Visual Basic For Applications* para realizar esse modelo. Para o desenvolvimento do modelo foram definidas algumas políticas operacionais bem como alguns requisitos a cumprir durante a elaboração do simulador.

O modelo de simulação desenvolvido é considerado um modelo viável, uma vez que pode ser aplicado sem que ocorram bloqueios no sistema.

Palavras-chave: Mina Subterrânea, Simulação, Veículos de transporte, Excel, Produtividade, Escapatória.

Abstract

Portugal is considered a mining country, so it is important to explore that potential in the country benefit. It is a sector that entails high costs in its activity, namely in investigation and gets a satisfactory revenue, meaning that it is essential to study mines operations modes. This analysis aims to increase the number of trips made by each transportation vehicle during a working day, i.e., increasing the productivity of mines.

The objective of this work is the development of a simulator for traffic management in underground mines. This means, a simulator was created to model the movement of transport vehicles, particularly trucks in underground mines. In order to do that, Excel was used as well as *Visual Basic for Applications*. Some operational policies were defined for the development of the model as well as some requirements to be met during the elaboration of the simulator.

The simulation model developed is considered a viable model since it can be applied without the occurrence of blockages in the system.

Keywords Underground mine, Simulation, Transportation Vehicle, Excel, Productivity, Escape.

Índice

Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xiii
Simbologia.....	xv
Simbologia.....	xv
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. ESTADO DA ARTE	5
3. DESCRIÇÃO DO MODELO.....	13
3.1. Considerações gerais.....	13
3.2. Considerações sobre o simulador	16
4. RESULTADOS	33
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	37
5.1. Conclusão.....	37
5.2. Trabalhos Futuros	38
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1. Estrutura da mina.	14
Figura 3.2. Folha de Excel que contém dados essenciais e as variáveis de estado.	17
Figura 3.3. Folha de Excel tabelaxy utilizada para resolver problemas de conflitos.	18
Figura 3.4. Folha de Excel dados que serve para o cálculo da fila de espera entre outras situações.	19
Figura 3.5. Fluxograma do menu do simulador.....	21
Figura 3.6. Movimento do veículo no sentido descendente (out).	23
Figura 3.7.Conflito: (a Situação de existência de veículo no sentido ascendente); (b) Situação de existência de veículo no sentido descendente.....	25
Figura 3.8.Fluxograma da função que evita a ocorrência de bloqueios sempre que se pretende mudar de segmento.	28
Figura 3.9. Fluxograma do movimento de veículos no sentido back.	29
Figura 3.10. Funções para o registo das variáveis de estado: (a) Função escrever_out; (b) Função escrever_back.	30

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Lista e síntese dos artigos estudados.	6
Tabela 3.1. Lista e descrição das variáveis necessárias para o desenvolvimento do simulador.	19

SIMBOLOGIA

Simbologia

chegada_refúgio(v) – Tempo a que o veículo v chega ao refúgio

deltat – Incremento fixo de tempo

h – Tempo mínimo de avanço entre dois veículos que se deslocam no mesmo sentido

L – Número de escapatórias

n – Número de veículos

pos(v) – Posição atual do veículo v

q(v) – Tempo que o veículo v tem de esperar na fila de espera

r(v) – Tempo restante para que o veículo v complete o segmento atual

Rampa – Comprimento do túnel da mina

R_back(v) – Tempo restante para que o veículo v complete o segmento atual no sentido back

refúgio(v) – Segmento de refúgio do veículo v

R_out(v) – Tempo restante para que o veículo v complete o segmento atual no sentido out

seg(v) – Segmento em que o veículo v se encontra

sentido(v) – Direção da viagem do veículo v

t(v) – Tempo a que o último veículo v foi movido

tempo_executar_back – Tempo de executar um segmento, na direção back

tempo_executar_out – Tempo de executar um segmento, na direção out

Tl – Duração de carregamento no carregador

Tu – Duração de descarga na superfície

v – Veículo a ser movido no interior da mina

Vel_back – Velocidade dos veículos carregados que viajam no sentido back

Vel_out – Velocidade dos veículos vazios que viajam no sentido out

1. INTRODUÇÃO

O setor mineiro em Portugal está presente ao longo dos tempos. Desde o período dos romanos que se faz o aproveitamento dos recursos minerais metálicos. Existem imensos vestígios desse período que se podem observar por todo o país, principalmente explorações de ouro, como é o caso de Tresminas, que pertence ao concelho de Vila Pouca de Aguiar, e que atualmente ainda são considerados locais de elevada importância arqueológica. A meio do século XIX, a mina de S.Domingos, no concelho de Mértola, foi bastante importante, uma vez que implicou um projeto bastante complexo. Este projeto originou a construção de infraestruturas internas e externas ao espaço mineiro, que até à data não se tinha verificado. Na segunda guerra mundial, o setor mineiro atingiu uma proporção que nunca tinha sido alcançada, e que foi um dos pilares da economia de então. Foi da elevada atividade mineira que surgiram as minas da Panasqueira, que ainda hoje estão ativas, colocando Portugal no segundo lugar europeu de produção de tungsténio. Mais recentemente, a meio dos anos oitenta, as minas de Neves-Corvo, no Alentejo, iniciaram a sua atividade. Posteriormente com a descoberta da mina do Lombador e da Semblana aumentou o seu tempo de vida em trinta anos. Assim, Portugal ocupa a segunda posição de produção de cobre a nível Europeu. Desde os finais dos anos 90 até aos finais de 2004, a indústria extrativa em Portugal revelou um cenário depressivo devido às condições do mercado dos metais, onde as cotações sofreram reduções significativas, e à preservação ambiental, colocando em causa a subsistência de algumas minas. Apesar deste cenário desfavorável, sempre existiu atividade de prospeção, pesquisa e desenvolvimento dos recursos minerais que assumia um papel de destaque na economia nacional. A partir de 2005 surge um aumento substancial na entrada de pedidos de áreas de prospeção e pesquisa de minérios metálicos, e até Outubro 2012 foram assinados 250 novos contratos de exploração. Essas áreas de prospeção e pesquisa representam um investimento de dezenas de milhões de euros em conhecimento geológico.

Atualmente já só se encontram ativas três minas metálicas nomeadamente, Neves-Corvo, Aljustrel e Panasqueira. É de salientar que, segundo dados referentes a 2011, estas minas representaram 57% (460 M€) do valor das exportações portuguesas em recursos

minerais que em termos globais alcançaram 807 M€. Os minerais destinados à construção (rochas ornamentais) representaram 37.5% (303 M€) e os minerais industriais apenas 5.5% (42 M€) (Caxaria, 2012).

Estes valores têm um peso significativo na economia do país, pelo que (Caxaria, 2012) afirma que “as perspectivas económicas para Portugal podem ser consideradas otimistas, não só para as futuras exportações, mas também como motor do desenvolvimento regional”.

Esta indústria é muito importante para a manutenção das sociedades atuais, uma vez que muitos produtos que utilizamos diariamente provêm dela. No entanto, não se deve esquecer que os recursos mineiros são finitos e que em muitas situações não são bem aproveitados, uma vez que existem minas que não são devidamente exploradas (Seco, 2011).

“Como vimos pelo seu passado rico no que respeita ao aproveitamento dos seus recursos minerais, Portugal é um país mineiro (Martins & Carvalho, 2007)”. Assim, uma vez que a Europa se encontra com défice de matérias-primas, Portugal, com este elevado potencial geológico, poderá ocupar uma posição favorecida a nível Europeu.

O setor mineiro envolve elevados investimentos, nomeadamente, as áreas de prospeção, pesquisa e exploração, onde são gastas largas dezenas de milhões de euros em conhecimento geológico, pelo que se torna essencial aumentar a produtividade do setor. A produtividade é a relação entre os meios que são utilizados para produzir, nomeadamente, matérias-primas, energia, mão-de-obra, e aquilo que é realmente produzido. Assim, este termo está relacionado com a eficiência na utilização dos recursos e do tempo, ou seja, quanto maior for o tempo utilizado para obter o produto final, menor é a produtividade. O objetivo de qualquer organização é o aumento da produtividade que é conseguido através de métodos de gestão eficientes. Este aumento é bastante importante na medida em que os mercados são cada vez mais competitivos. Se a empresa não oferecer os produtos com a mesma qualidade, num curto espaço de tempo será prejudicada uma vez que as outras irão fazê-lo. O aumento da produtividade, no setor mineiro, pode ser atingido de várias formas, das quais se destacam: escolha de equipamento adequado ao tipo de mina, *design* adequado das frentes de extração, estrutura da mina e gestão eficiente do tráfego.

O tema desta dissertação está associado a este último ponto. A abordagem para a resolução desta problemática, escolhida no âmbito desta dissertação, foi a simulação. A

finalidade desta dissertação é o desenvolvimento de um simulador para a gestão de tráfego em minas subterrâneas. Para a realização deste simulador foram definidas algumas considerações iniciais, nomeadamente, um determinado número de veículos de transporte e de escapatórias, um único declive (corredor) e um carregador. Os veículos movimentam-se, de forma cíclica, desde a superfície até ao carregador subterrâneo, onde são carregados, e posteriormente deslocam-se à superfície onde irão descarregar o minério.

De uma forma sintetizada, esta dissertação é composta por seis capítulos estruturados da seguinte forma:

- **Capítulo 1 – Introdução:** Neste capítulo é apresentado o enquadramento do projeto e os objetivos a serem cumpridos.
- **Capítulo 2 - Estado da arte:** Neste capítulo são mostrados os trabalhos que já foram realizados na área de estudo desta dissertação.
- **Capítulo 3 - Descrição do modelo:** Neste capítulo descreve-se o modelo bem como todas as variáveis e os pressupostos assumidos para a realização do mesmo.
- **Capítulo 4 - Resultados e discussão**
- **Capítulo 5 – Conclusões e considerações finais:** Neste capítulo apresentam-se as conclusões do trabalho efetuado, bem como algumas sugestões para o trabalho futuro.
- **Capítulo 6 - Referências bibliográficas**

2. ESTADO DA ARTE

A literatura sobre o estudo do tráfego em minas subterrâneas é escassa. Não obstante, existem alguns artigos que abordam o problema do ponto de vista estratégico, dos quais se destacam os seguintes:

- Escolha dos equipamentos de extração a utilizar, por exemplo, camiões vs comboios, Higgins et al (1996) e Higgins et al (1997).
- *Design* da mina, Strugul (2000).
- Localização de cruzamentos e número ideal de escapatórias, Anjomshoa (2011).
- Apoio à decisão para a escolha de frentes de extração.

Contudo, não é este o âmbito desta dissertação. O âmbito deste trabalho consiste em desenvolver um simulador que permita simular os movimentos dos camiões no interior de uma mina subterrânea. Os estudos que consideram o âmbito operacional são escassos. Na Tabela 2.1 podem-se encontrar os artigos que foram analisados e que consideram a gestão operacional de minas.

Tabela 2.1.Lista e síntese dos artigos estudados.

Autor (s) /Ano	Título do artigo/tese	Tipo de transporte	Tipo de mina	Descrição do trabalho	Métodos utilizados	Tipo de estudo
(Higgins, Kozan, & Ferreira, 1996)	Optimal scheduling of trains on a single line track.	Comboios.	Minas a céu aberto.	Desenvolvimento e utilização de um modelo para otimizar os horários dos comboios em linhas ferroviárias individuais.	Procedimento branch e bound.	Modelo matemático-Programa inteiro misto não-linear.
(Higgins, Kozan, & Ferreira, 1997)	Modelling the number and location of sidings on a single line railway.	Comboios.	Não existe informação no artigo.	Determinar o número requerido e a posição dos ramais nas linhas ferroviárias individuais.	Procedimento branch e bound.	Modelo matemático Programa inteiro misto não-linear; Simulação.

Autor (s) /Ano	Título do artigo/tese	Tipo de transporte	Tipo de mina	Descrição do trabalho	Métodos utilizados	Tipo de estudo
(Kolonja, Kalasky, & Mutmansky, 1993)	Optimization of dispatching criteria for open-pit truck hauling system design using multiple comparisons with the best and common random numbers.	Camiões	Não existe informação no artigo.	Simulação do sistema de expedição de camiões tendo como medida de desempenho a máxima produção esperada do sistema camião -pá. A simulação foi efetuada considerando diferentes sistemas de expedição.	MCB (Múltipla comparação com o melhor); Combinação de MCB com a técnica de redução da variância conhecida normalmente como números aleatórios (CRN).	Simulação.
(Hodkiewicz, Richardson, & Durham, 2010)	Challenges and Opportunities for Simulation modelling integrating mine haulage and truck shop operations.	Camiões.	Todo o tipo de minas.	Modelos de simulação realizados concentrando-se em situações verídicas, em que os objetivos de produção mineira são influenciados pelos ativos móveis, como escavadoras e camiões.	Não existe informação no artigo.	Simulação.

Autor (s) /Ano	Título do artigo/tese	Tipo de transporte	Tipo de mina	Descrição do trabalho	Métodos utilizados	Tipo de estudo
(Anjomshoa, 2011)	Optimal placement of passing bays in underground mines	Camiões.	Minas subterrâneas.	Desenvolver um modelo que melhore a produtividade do transporte de minério e desperdícios considerando o efeito da localização ideal das baías de passagem.	Não existe informação na tese.	Simulação; Modelo matemático Programa inteiro misto.
(Vagenas, Oldenburg, & Clément, 1996)	3-D Visualization and Simulation Modelling of Underground Hard Rock Mining Operations.	Não existe informação no artigo.	Minas subterrâneas.	Desenvolvimento e aplicação de um modelo convencional de simulação por eventos discretos e a teleoperação /automatização das operações de mineração subterrânea.	Não existe informação no artigo.	Simulação.

Conforme se pode verificar na tabela anterior, o problema de gestão operacional de minas tem sido abordado de duas formas diferentes: por modelos de otimização ou por simulação.

A simulação permite criar modelos que são réplicas do mundo real num espaço de tempo reduzido, ou seja, pode-se analisar o funcionamento do sistema ao longo de muitas horas em apenas alguns segundos, (Anjomshoa, 2011). Este tipo de abordagem normalmente aplica-se em sistemas reais complexos e que podem apresentar um comportamento que seja imprevisível, (Hodkiewicz, Richardson, & Durham, 2010).

Uma das principais razões pelas quais o modelo de simulação se tornou bastante popular é a fácil utilização da animação, pois pode-se recorrer à animação dos elementos fundamentais do sistema. Estes são representados por ícones que podem sofrer alterações da forma, cor ou posição sempre que ocorre uma alteração de *status* na simulação (Vagenas, Oldenburg, & Clément, 1996).

Através da análise da tabela anterior, é visível que a maioria dos artigos estudados recorre à simulação. Esta situação não se verifica unicamente nos artigos estudados. Segundo (Hodkiewicz, Richardson, & Durham, 2010), “A simulação tem sido amplamente utilizada para estudar e melhorar as operações na indústria de mineração.” Há imensos artigos referentes a diversos tipos de indústrias onde se recorre à simulação para a resolução de problemas. No entanto, existem poucos estudos sobre a simulação de transporte em minas, particularmente para sistemas em que a extração é realizada por camiões (Hodkiewicz, Richardson, & Durham, 2010).

Existem alguns potenciais benefícios em recorrer à animação durante a simulação de um sistema de mineração, tais como: auxílio na validação do modelo, auxílio com o *debugging* e a ilustração do comportamento dinâmico do processo de mineração que está a ser estudado (Vagenas, Oldenburg, & Clément, 1996).

A tarefa de criar modelos de simulação de métodos de minas subterrâneas é bastante desafiadora. Os especialistas, ao desenvolver os modelos, podem deparar-se com algumas dificuldades, nomeadamente, recolha de dados, recursos de *software* e facilidade de utilização. Por exemplo:

- **Problemas relacionados com a recolha de dados**

A tarefa de recolher os dados de entrada das minas nem sempre é fácil. A maioria dos dados não se encontra disponível num formato desejado para quem irá

construir o modelo. A generalidade dos dados recolhidos encontra-se em documentos escritos, em vez de se encontrar em base de dados no computador ou em sistemas de monitorização dentro dos equipamentos mineiros. A desvantagem em utilizar os documentos escritos é que estes são propensos a erros humanos e requer um esforço extra para analisar a confiabilidade da informação recolhida.

- **Problemas relacionados com as ferramentas de simulação**

Existem problemas relacionados com as ferramentas de simulação uma vez que os programas que existem não podem ser utilizados diretamente em todas as aplicações sendo necessário adaptá-los. Exemplo disso é o programa *Automod* que é um simulador industrial destinado a modelar plantas e linhas de montagem de fábrica e não sistemas de mineração. No entanto, com algum esforço ao nível da programação é possível adaptar o *software* de acordo com as necessidades dos sistemas de mineração.

Outro problema relacionado com as ferramentas é o facto de algumas ferramentas dos *softwares* necessitarem de computadores com altos desempenhos.

- **Problemas relacionados com a familiaridade com o modelo de simulação**

Uma vez que os modelos de simulação são complexos e sofisticados torna-se essencial a formação de especialistas (Vagenas, Oldenburg, & Clément, 1996).

Como já foi referido, o âmbito desta dissertação centra-se na abordagem por simulação. No entanto, no ano anterior foi realizado um estudo semelhante recorrendo à utilização de modelos matemáticos, nomeadamente, Programação Inteira Mista (MIP) (Soares, 2014). Esta abordagem não teve os resultados esperados, uma vez que o sistema em estudo era demasiado complexo, daí o facto de se ter decidido abordar o problema por simulação.

O desenvolvimento de simulador pode ser realizado utilizando *softwares* comerciais, linguagens de simulação ou linguagens de programação gerais. (Vagenas, Oldenburg, & Clément, 1996), recorreram a um *software* comercial para o desenvolvimento do seu estudo. O *software* utilizado foi o *AutoMod*, uma vez que oferece uma rápida geração dos modelos de simulação que estão a ser estudados e que podem ser animados. O *AutoMod* faculta a visualização gráfica em 3D, sem limites para as posições ou tamanho da imagem a ser exposta.

As linguagens de simulação que existem são algumas, no entanto segundo o autor (Sturgul, 2000) as melhores linguagens para resolver os problemas relacionados com minas, são a linguagem SIMAN, a SIMCRIPT II 5 e SLAM.

No que se refere às linguagens de programação gerais são inúmeras as que existem no mercado. (Higgins, Kozan, & Ferreira, 1997) recorreram ao Fortran para desenvolver um simulador para a gestão operacional de minas.

A linguagem utilizada no âmbito desta dissertação foi *Visual Basic for Applications*, uma linguagem de programação geral. Esta linguagem está incorporada em todos os programas do Microsoft Office, neste caso, o Microsoft Excel. Tentou-se recorrer ao *Simul8*, um *software* de simulação, para ser utilizado nesta tese. No entanto, não foi possível modelar o comportamento dos veículos de transporte no interior de minas subterrâneas. O *simul8* recorre a objectos pré-programados, com os quais não se conseguiu desenvolver o modelo pretendido. Assim, decidiu-se recorrer a uma linguagem genérica de programação para desenvolver o modelo, de modo a adquirir um domínio adequado do problema que poderá ser utilizado no futuro para desenvolver novos modelos recorrendo a *softwares* de simulação.

É muito importante reter a ideia de que, o modelo de simulação mostra como o sistema irá operar para um determinado conjunto de parâmetros, no entanto não garante a obtenção da melhor solução para o problema (Sturgul, 2000).

3. DESCRIÇÃO DO MODELO

3.1. Considerações gerais

O *software* utilizado no âmbito desta dissertação foi o Microsoft Excel recorrendo à linguagem *Visual Basic for Applications*.

A fim de alcançar de forma satisfatória o objetivo proposto, foi essencial definir decisões estratégicas bem como decisões táticas.

As decisões estratégicas devem ser pensadas a longo prazo, para que futuramente não ocorram problemas. Uma decisão estratégica implementada foi a introdução de uma escapatória a meio do comprimento da mina. Isto facultou a possibilidade dos camiões não terem de recuar distâncias significativas quando se cruzassem com veículos em sentido oposto, evitando assim a perda tempo. Esta decisão influencia o fluxo de veículos no interior do túnel e é por isso fundamental para o desempenho do sistema de transporte. Assim, com uma gestão de transportes eficiente poderá conseguir-se reduzir custos e aumentar a produtividade da mina. No que diz respeito às decisões táticas, decidiu-se utilizar a simulação por forma a avaliar se a escapatória introduzida foi ou não benéfica para a gestão dos veículos de transporte.

No que se refere aos métodos de avanço no tempo em simulação, estes podem ser dois: incremento fixo de tempo ou avanço para o próximo evento. Esta questão foi analisada e considerando que era necessário um modelo dinâmico, que permitisse perceber todo o comportamento dos veículos no interior da mina ao longo do tempo, decidiu-se utilizar no desenvolvimento deste simulador o incremento fixo de tempo. Assim, com este método de avanço é possível compreender as decisões necessárias em tempo real para evitar o conflito na prática. Este método faz avançar o tempo tendo em conta o valor do incremento, ou seja, em cada passo fixo de tempo os veículos movimentam-se atualizando o estado atual de cada veículo.

Antes de se iniciar o desenvolvimento do simulador foi crucial definir os dados que iriam ser necessários, tais como: velocidades ascendentes e descendentes e comprimento da rampa, entre outros. No entanto, este modelo não foi desenvolvido para

um caso de estudo, isto é, com dados referentes a uma mina real, mas sim para um caso hipotético. Na tentativa de definir os dados que iriam ser necessários deparou-se com a dificuldade de ter acesso a dados reais médios utilizados em minas para aplicar no modelo desta dissertação. Este modelo foi então elaborado recorrendo a dados fictícios, o que não o torna inválido ou desinteressante, uma vez que tendo acesso a esses dados reais podemos facilmente substituir os dados fictícios.

É possível fazer diversas alterações ao modelo base por forma a alcançar a maior produtividade do sistema. No entanto, devido à complexidade do problema e do tempo reduzido para a realização desta dissertação tornou-se inexecutável a realização de alterações.

No modelo que foi estudado considerou-se um único declive, com um número fixo de escapatórias e um número máximo de veículos de transporte que podem estar a trabalhar na mina. Definiram-se três escapatórias, com igual espaçamento, uma à superfície, outra no carregador e outra aos 100 m, ou seja, a meio do declive para o qual se definiu um comprimento de 200 m. O corredor do túnel foi dividido em $L+1$ segmentos, numerados de $1, \dots, L+1$. O segmento especial 0 representa a superfície e o segmento $L+2$ representa o carregador, sendo este único. Na Figura 3.1 está ilustrado o esquema da mina estudada.

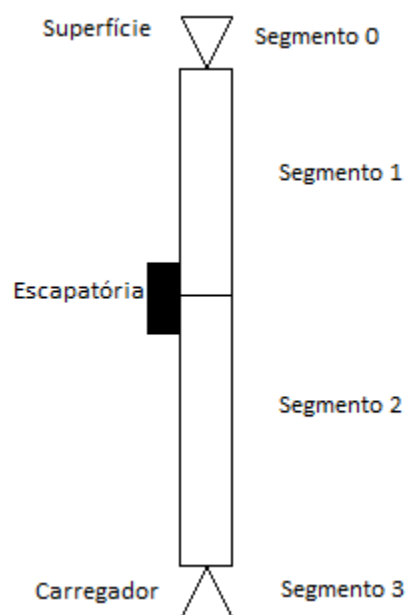


Figura 3.1. Estrutura da mina.

Os dois segmentos que foram considerados no declínio da mina, o segmento 1 e o segmento 2, têm a mesma dimensão, 100 m.

Os veículos de transporte podem movimentar-se no túnel da mina segundo dois sentidos: descendente (movimento *out*) e ascendente (movimento *back*). O sentido descendente diz respeito ao movimento do veículo desde a superfície até chegar ao carregador. O sentido ascendente como seria de prever é o oposto ao descrito, este sentido refere-se aos veículos que saem do carregador com destino à superfície. Assim, são definidas velocidades distintas para cada sentido, uma vez que num sentido os veículos vão carregados demorando mais tempo a fazer o trajeto do que os veículos que não transportam nenhuma carga de minério. Por conseguinte, também são definidos tempos distintos para completar os segmentos, uma vez que estes valores dependem das velocidades atribuídas e do comprimento de cada segmento, que neste caso é o mesmo.

Para a construção do modelo de simulações foram definidas algumas políticas operacionais, nomeadamente os veículos que estão carregados com minério têm sempre prioridade a movimentarem-se na direção à superfície. Outra política introduzida é o facto dos veículos de transporte nunca poderem inverter o sentido a meio do túnel. Os únicos locais onde isso poderá ser realizado são na superfície ou no carregador.

Para que seja possível tornar o modelo viável é necessário definir um conjunto de requisitos essenciais para serem aplicados ao longo da simulação. Esses requisitos são os seguintes:

- Os movimentos que os veículos de transporte, neste caso camiões, realizam são cíclicos, isto é, os veículos partem da superfície com destino ao carregador único subterrâneo, onde irão ser carregados. Posteriormente, os camiões saem do carregador em direção à superfície, voltando ao estado inicial. O simulador pára assim que termine o tempo de simulação estipulado.
- São definidos tempos de carga e descarga no início da simulação. Estes valores são determinísticos e podem ser facilmente alteráveis no início de qualquer simulação.
- Quando os camiões chegam às extremidades do corredor, estes deixam o corredor do túnel, por um determinado período de tempo para carregar e descarregar o minério.
- Considera-se que todos os camiões têm as mesmas características, isto é, peso, dimensão, quantidade de carga, entre outras.

- A capacidade das escapatórias é única, ou seja, apenas pode acomodar um caminhão de cada vez, possibilitando assim a passagem de outro.
- No carregador subterrâneo apenas se pode carregar um caminhão de cada vez. Assim, os caminhões vão ter de esperar numa fila de espera de capacidade ilimitada, sempre que chegarem ao carregador e este esteja ocupado.
- Na superfície, os caminhões podem descarregar o minério ao mesmo tempo, sem necessidade de formar filas.
- Sempre que um caminhão estiver a movimentar-se para um novo segmento do corredor, em direção ao carregador, terá de averiguar se o poderá fazer. Se existir um veículo em sentido oposto este caminhão não poderá avançar para o novo segmento e deverá manter-se na escapatória.
- Os veículos, quando saem da superfície, não podem sair todos ao mesmo tempo. Por essa razão, foi definido um tempo de avanço mínimo entre caminhões, uma vez que estes não poderiam ocupar as mesmas posições simultaneamente.
- A quantidade de tempo requerida para percorrer cada segmento em cada direção é definida e é um valor determinístico.
- Os veículos no sentido ascendente, isto é, os caminhões carregados apenas têm necessidade de averiguar a viabilidade do seu movimento quando saem do carregador. Depois disso, podem mudar de segmento sem a necessidade dessa averiguação.

Estes requisitos associados evitam que ocorra o bloqueio do sistema, ou seja, a impossibilidade de mover um veículo para a frente até ao seu destino.

3.2. Considerações sobre o simulador

O estado do sistema é representado no simulador por uma lista dos estados dos veículos de transporte presentes no processo cíclico de extração de minério. O estado de cada veículo é caracterizado por um conjunto de variáveis. Assim, esse estado é caracterizado por:

- $t(v)$, representa o tempo em que o último veículo v foi movido;
- $sentido(v)$, representa a direção da viagem do veículo v (direção $out=1$ e direção $back=2$);

- $seg(v)$, representa o segmento em que o veículo v se encontra;
- $pos(v)$, representa a posição atual do veículo v ;
- $r(v)$, representa o tempo restante para que o veículo v complete o segmento atual. Esta variável ao longo do desenvolvimento do simulador é decomposta em R_{out} , tempo restante para completar o segmento atual no sentido *out* e R_{back} , tempo restante para completar o segmento atual no sentido *back*.

Foi criado um conjunto de folhas no Excel para se poder atualizar o estado de cada veículo bem como, registrar todas estas variáveis, para posteriormente realizar o gráfico do movimento de todos os veículos presentes no estudo. Na primeira folha do Excel registam-se todos os dados necessários para o início da simulação, bem como as variáveis de estado associadas ao primeiro veículo a ser movido na mina subterrânea. Para além das variáveis de estado referidas, introduziu-se uma variável, $q(v)$, que representa o tempo que o veículo em causa irá ter de esperar na fila de espera do carregador. Esta variável é registada apenas por forma a facilitar a codificação, assim não é considerada uma variável de estado. Na Figura 3.2 é visível a primeira folha do Excel.

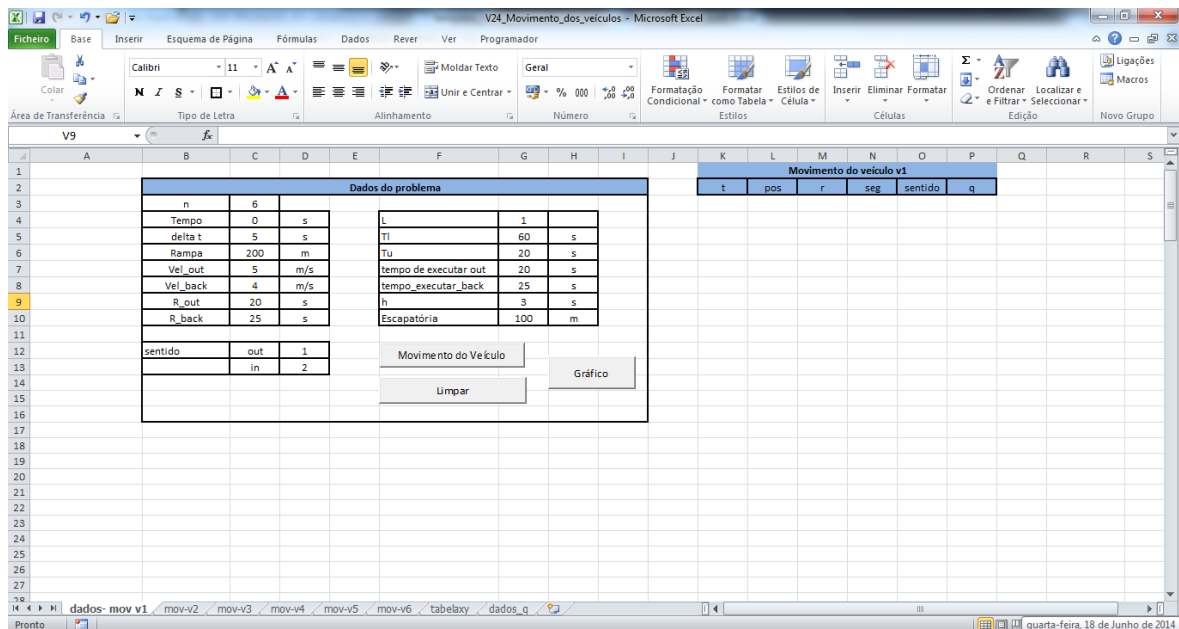


Figura 3.2. Folha de Excel que contém dados essenciais e as variáveis de estado.

O simulador criado pode ser considerado um sistema flexível, uma vez que é possível alterar facilmente todos os dados do problema. Um exemplo disso é o número de

veículos no sistema, definido pela variável, n . Neste caso, definiu-se um limite máximo de seis veículos (apesar de poder ser o que o utilizador pretender), uma vez que este valor já é razoável para um sistema deste tipo. Assim, criaram-se mais cinco folhas no Excel, que estão preparadas para serem atualizadas consoante o número de veículos, isto é, se o número de veículos presentes for de três apenas as primeiras três folhas são atualizadas.

Nesta folha do Excel foram também criados três botões principais, que são o Movimento do veículo, o botão Gráfico e o Botão Limpar. Estes botões têm funções específicas, ou seja, ao clicar no primeiro botão mencionado todas as variáveis de estado, de todos os veículos, são registadas nas respetivas folhas até o ciclo terminar. O botão Gráfico surgiu da necessidade de visualizar todos esses movimentos. A construção do gráfico foi feita recorrendo a duas variáveis de estado, nomeadamente, o tempo e a posição de cada veículo. Por fim, introduziu-se o botão Limpar cujo objetivo, é eliminar todas as variáveis de estado, para que posteriormente seja possível realizar uma nova simulação sem ocorrerem problemas de conflito com as variáveis de simulações anteriores.

Para além das folhas já mencionadas, para o registo das variáveis de estado, introduziram-se mais duas folhas de Excel que servem de auxílio para resolver problemas de conflito e cálculo da fila de espera, entre outros. Todos estes problemas serão explicados posteriormente. Na Figura 3.3 está presente a folha designada por “tabelaxy” e na Figura 3.4 está presente a folha designada por “dados”.

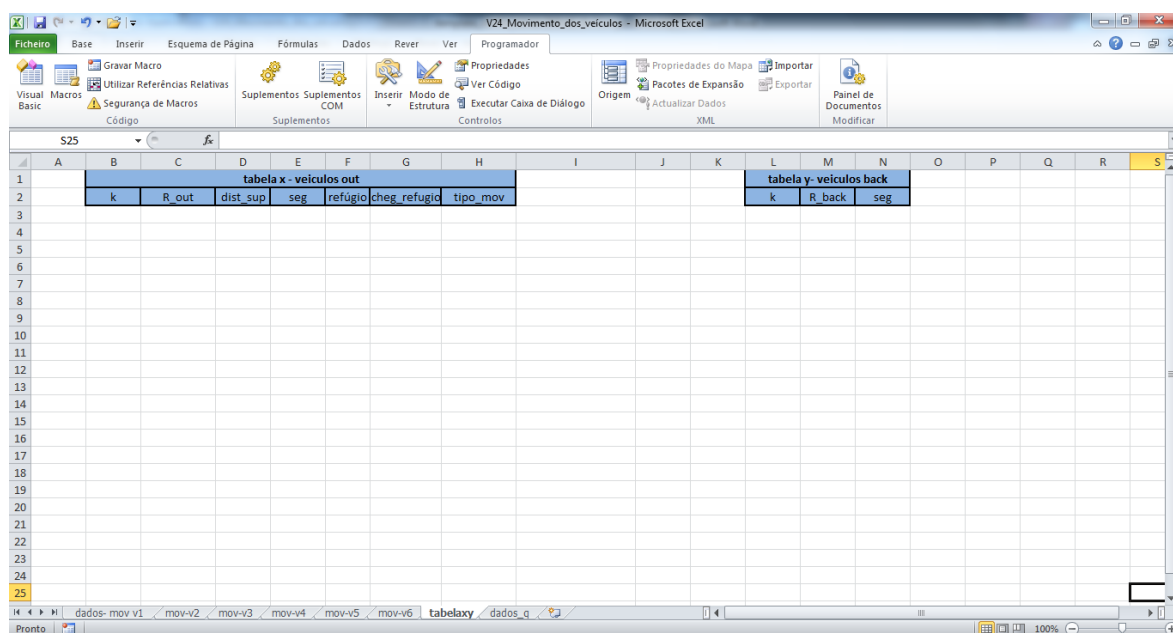


Figura 3.3. Folha de Excel tabelaxy utilizada para resolver problemas de conflitos.

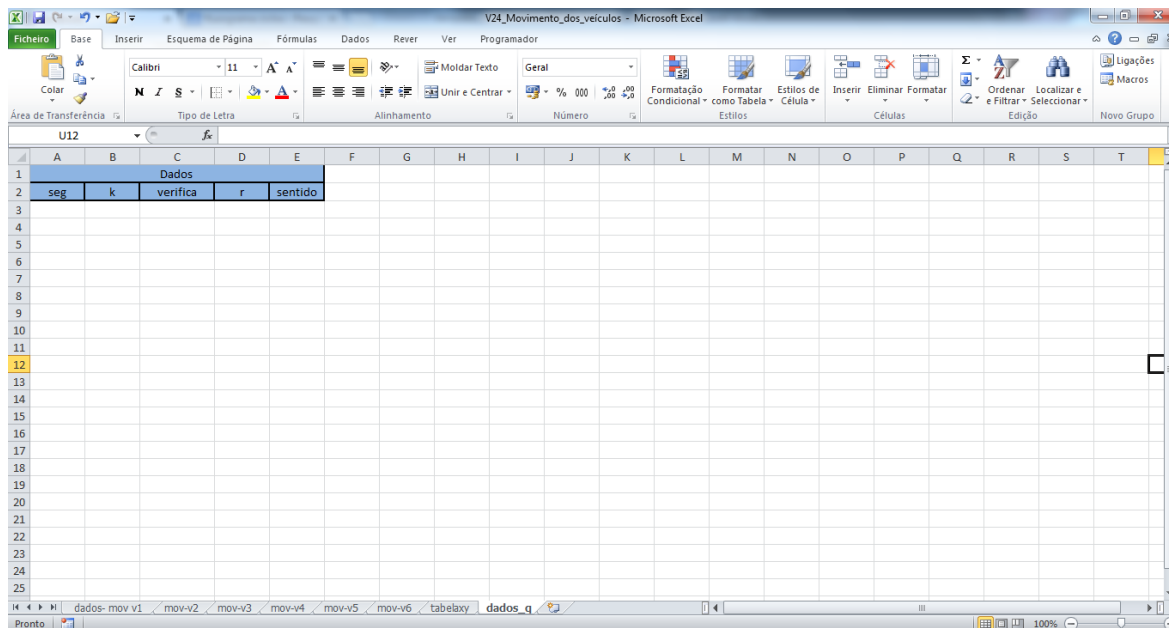


Figura 3.4. Folha de Excel dados que serve para o cálculo da fila de espera entre outras situações.

Na Tabela 3.1 é possível encontrar todos os dados que são necessários para interpretar corretamente o simulador desenvolvido.

Tabela 3.1. Lista e descrição das variáveis necessárias para o desenvolvimento do simulador.

Variável	Descrição	Valor atribuído
h	Tempo mínimo de avanço entre dois veículos que se deslocam no mesmo sentido.	3s
$tempo_executar_out$	Tempo de executar um segmento, na direção <i>out</i> .	20s
$tempo_executar_back$	Tempo de executar um segmento, na direção <i>back</i> .	25s
Tl	Duração de carregamento no carregador.	60s
Tu	Duração de descarga na superfície.	20s
Vel_out	Velocidade dos veículos vazios que viajam no sentido	5m/s

Variável	Descrição	Valor atribuído
	<i>out.</i>	
<i>Vel_back</i>	Velocidade dos veículos carregados que viajam no sentido <i>back</i> .	4m/s
<i>Rampa</i>	Esta variável representa o comprimento do túnel estudado.	200m
<i>deltat</i>	Incremento fixo de tempo.	5s

É de salientar que o simulador desenvolvido considera que todas as variáveis mencionadas são constantes ao longo de toda a simulação e que foram definidas inicialmente.

Ao longo do desenvolvimento do simulador sentiu-se a necessidade de o dividir em funções diferentes por forma a simplificar o código e a facilitar a visualização do que se pretende nas linhas de código. As funções presentes no código do simulador são as seguintes:

- Função_out, serve para descrever o movimento dos veículos no sentido descendente (*out*), uma vez que, dependendo do sentido da viagem os veículos se movimentam de forma diferente.
- Função_escrever_tabelaxy, serve para verificar a existência de conflito, quando algum veículo pretende mudar de segmento.
- Função_back, serve para descrever o movimento dos veículos no sentido ascendente (*back*).
- Função_escrever_out, serve para registar as variáveis de estado do veículo no sentido *out* na folha de Excel correspondente a esse veículo.
- Função_escrever_back, de forma análoga à função mencionada anteriormente, esta função regista as variáveis de estado dos veículos que se movimentam no sentido *back* na folha de Excel que lhe corresponde.

Na Figura 3.5 encontra-se o fluxograma do menu geral do simulador:

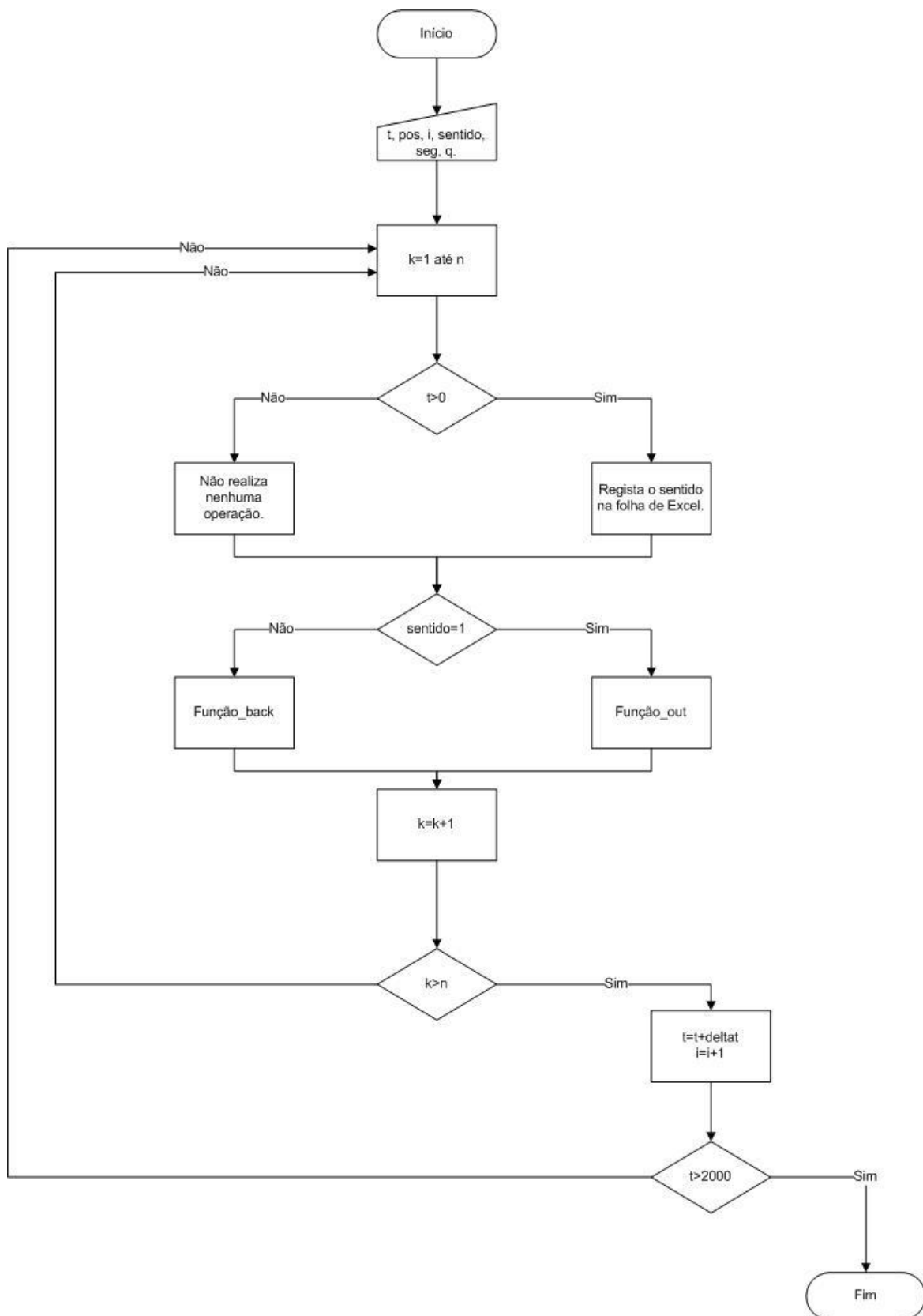


Figura 3.5. Fluxograma do menu do simulador.

Antes de iniciar o simulador definiu-se como ponto de partida a posição a zero, o tempo a zero e o sentido igual a 1, ou seja, o sentido descendente, para que assim fosse possível iniciar o movimento.

O fluxograma presente na Figura 3.5 funciona de forma cíclica enquanto o tempo for inferior a 2000 segundos, após esse valor a simulação termina. Basicamente, este menu serve apenas para verificar qual o tipo de movimento de cada veículo e assim chamar as funções que correspondem a esse movimento. No fim de cada veículo analisado, atualizam-se e registam-se todas as variáveis de estado. Assim que se registem todos os veículos, incrementa-se o tempo de simulação e repete-se o mesmo procedimento. A variável, i , apenas está aqui presente para que se registre, em cada valor de tempo, as variáveis de estado de cada veículo na folha de Excel.

Na Figura 3.6 encontra-se o fluxograma referente à função `_out`.

Quando o simulador inicia o seu ciclo, o tempo é igual a zero e todos os veículos têm de se encontrar à superfície. De seguida, irão sair com um tempo mínimo de 3 segundos de avanço entre eles, h .

O simulador irá verificar se o tempo que resta para o veículo v completar o segmento atual ($R_{out}(v)$) é superior ao incremento de tempo, $deltat$. Se for superior, o veículo avança para a próxima posição, ao valor de $R_{Out}(v)$ é diminuído o valor de $deltat$ e posteriormente chama-se uma função para registar estes valores na folha de Excel que corresponde ao veículo que está a ser analisado. Se o $R_{out}(v)$ for inferior a $deltat$, podem ocorrer duas situações: o veículo pode estar a mudar de segmento ou o veículo está prestes a mudar-se para o carregador.

Caso o veículo esteja a mudar para um novo segmento, é imprescindível saber se existe algum veículo no sentido descendente imediatamente à sua frente ou se existe algum veículo no sentido ascendente nesse segmento. Para isso, recorre-se à função `tabelaxy`, onde se define um movimento provisório, e caso nenhuma das situações referidas se verifique, o movimento é considerado viável e o veículo pode mudar-se para o novo segmento. Caso contrário, o veículo permanece na escapatória mais próxima até poder movimentar-se. Esta função será explicada em maior detalhe posteriormente.

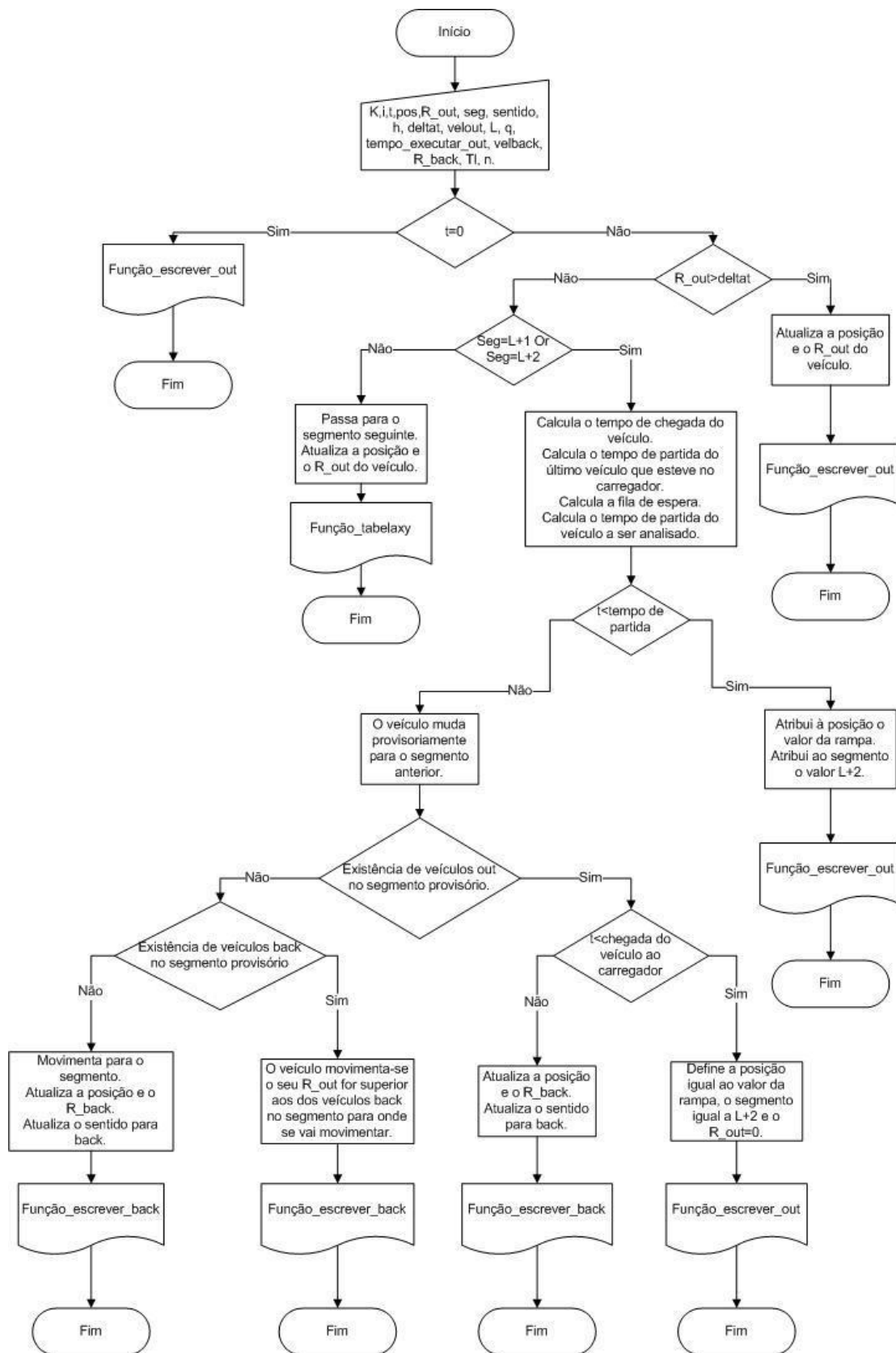


Figura 3.6. Movimento do veículo no sentido descendente (out).

Na situação do veículo estar a mudar-se para o carregador, é necessário ter em consideração que o carregador apenas tem capacidade unitária, ou seja, pode ser necessário uma fila de espera. Para o cálculo da fila é essencial retirar alguns dados, como o tempo de chegada do veículo que está a ser movido e o tempo de partida do último veículo a abandonar o carregador. Assim, a duração da fila de espera é dada por:

$$q = t_{partida_último_carregador} - t_{chegada_veículo_atual} \quad (3.1)$$

Após determinar o valor de q (v), calcula-se o tempo de partida do veículo atual e se o tempo de simulação for inferior ao de partida, mantém-se o veículo no carregador, caso contrário o veículo poderá movimentar-se para o segmento anterior ao carregador e assim iniciar o movimento ascendente. Para isso, tem de verificar se não existem veículos *out* no segmento. Se não existirem tem de verificar se existe algum veículo *back* no segmento. Se não existir, o veículo poderá mover-se e alterar o sentido para dois. Caso contrário, o veículo (admitindo que estamos analisar o veículo cor-de-rosa) faz o movimento provisório e só avança se o seu R_{back} for superior aos R_{back} de todos os veículos *back* no segmento (Figura 3.7 (a)).

Na situação de existirem veículos *out* no segmento (Figura 3.7 (b)), este veículo (admitindo que estamos analisar o veículo cor-de-rosa) terá de esperar que o veículo com maior R_{out} chegue ao carregador para que o possa abandonar.

A introdução da folha de Excel designada por dados foi imprescindível neste tipo de movimento. Todos os movimentos provisórios foram realizados nesta folha. Só após a decisão de movimentar-se ou não o veículo é que esses movimentos foram registados nas folhas de cada veículo. Também o cálculo da fila de espera foi realizado nesta folha. Assim podemos concluir que sem a utilização desta folha auxiliar a codificação seria muito mais difícil.

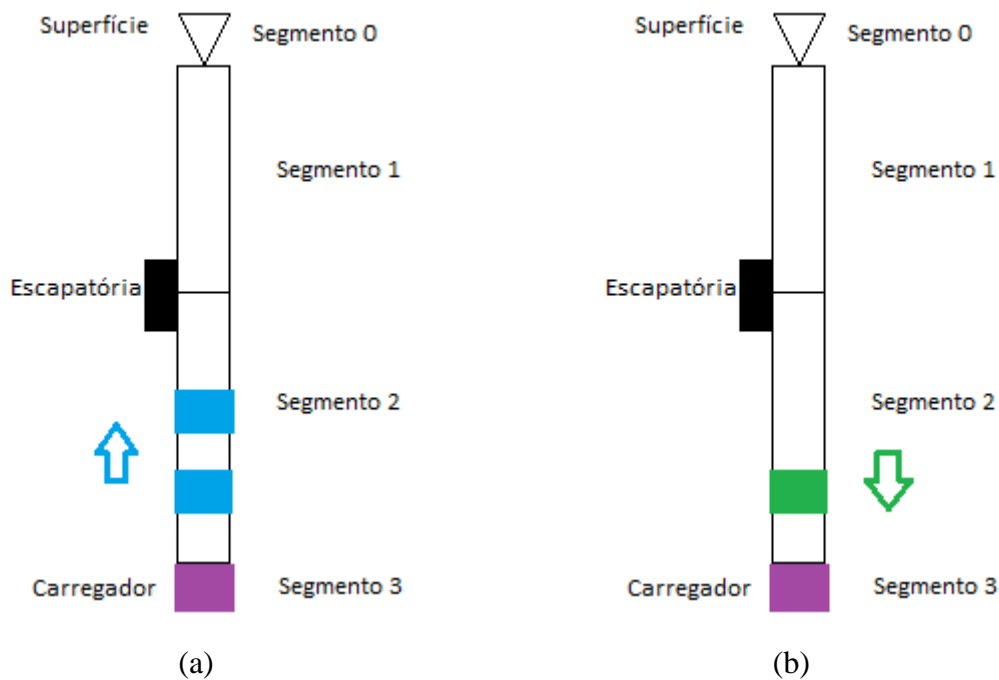


Figura 3.7. Conflito: (a Situação de existência de veículo no sentido ascendente); (b) Situação de existência de veículo no sentido descendente.

Na Figura 3.8 encontra-se o fluxograma da função *oxy*. A folha auxiliar designada por *Folhaxy* é essencial para realizar esta função, porque inicialmente se procede a movimentos provisórios e estes não podem ser feitos nas páginas definidas para os movimentos reais dos veículos.

Sempre que um veículo no sentido *out* pretende mudar para um novo segmento, excluindo o carregador e a superfície, esta função é chamada com a finalidade de verificar se com este movimento o sistema se torna inviável, ou seja, se ocorre bloqueio.

Inicialmente registaram-se nessa folha todos os veículos que estão no sistema, separados pelo seu sentido. Posteriormente, para verificar a existência de conflito foi essencial calcular o segmento de refúgio para cada veículo *out*, o tempo a que o veículo chega ao refúgio para cada veículo *out* bem como confrontar esses valores com os veículos *back*. Para calcular o segmento de refúgio foi preciso ordenar os veículos *out* de forma crescente da distância à superfície. De acordo com essa lista organizada, atribui-se um segmento e um tempo de refúgio a cada veículo.

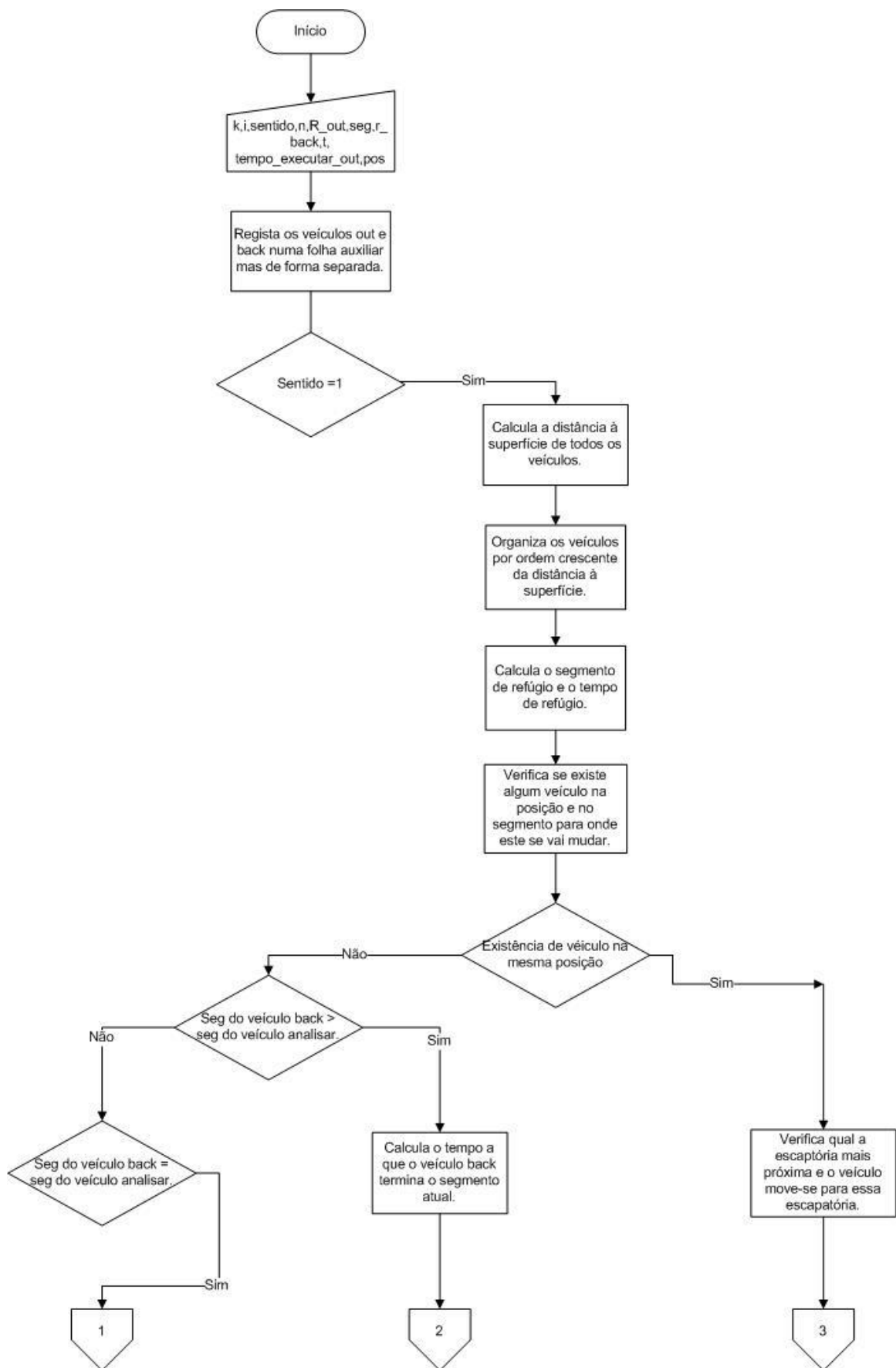
Assume-se que o segmento de refúgio do primeiro veículo da lista ordenada é o seu próprio segmento e para o cálculo dos segmentos dos outros veículos vai-se adicionando um valor ao segmento. No entanto, neste problema em estudo, apenas temos dois

segmentos de refúgio, o primeiro encontra-se no fim do segmento 1 e o outro no carregador. Como é expectável, apenas o primeiro veículo fica no refúgio 1 e todos os outros irão ficar no segundo refúgio. O tempo de refúgio é determinado somando o tempo atual, o tempo que resta para completar o segmento atual e o tempo de executar os segmentos entre o atual e o refúgio. Posteriormente verifica-se se existe algum veículo *out* no mesmo segmento e na mesma posição, e se isso se verificar este veículo não poderá movimentar-se para o novo segmento devendo movimentar-se para a escapatória mais próxima.

Depois de finalizado o cálculo dos segmentos de refúgio e dos tempos de refúgio é essencial confrontar essas informações com os veículos no sentido oposto. Existem duas maneiras do sistema bloquear que são as seguintes:

- Se o segmento provisório for igual ao segmento de um veículo *back*, este não vai poder movimentar-se e vai verificar qual a escapatória mais perto e movimenta-se para essa.
- Se o tempo que o veículo *back* demora a terminar o seu segmento for inferior ao tempo a que o veículo chega ao refúgio, o veículo não poderá fazer o movimento normal, verifica qual a escapatória mais perto e movimenta-se para essa. Caso contrário, o veículo poderá realizar o movimento normal.

Considerou-se que os veículos *back* podem esperar no carregador de forma a evitar que ocorra bloqueio.



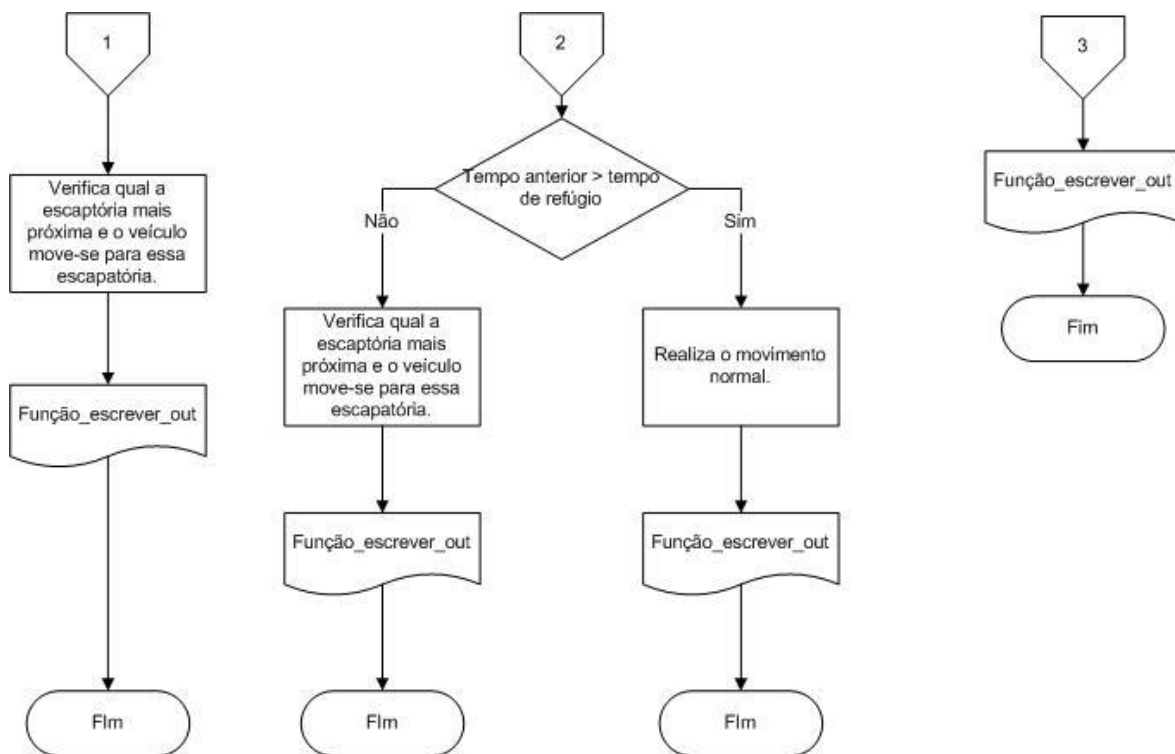


Figura 3.8. Fluxograma da função que evita a ocorrência de bloqueios sempre que se pretende mudar de segmento.

Encontra-se descrito na Figura 3.9 o movimento no sentido *back*.

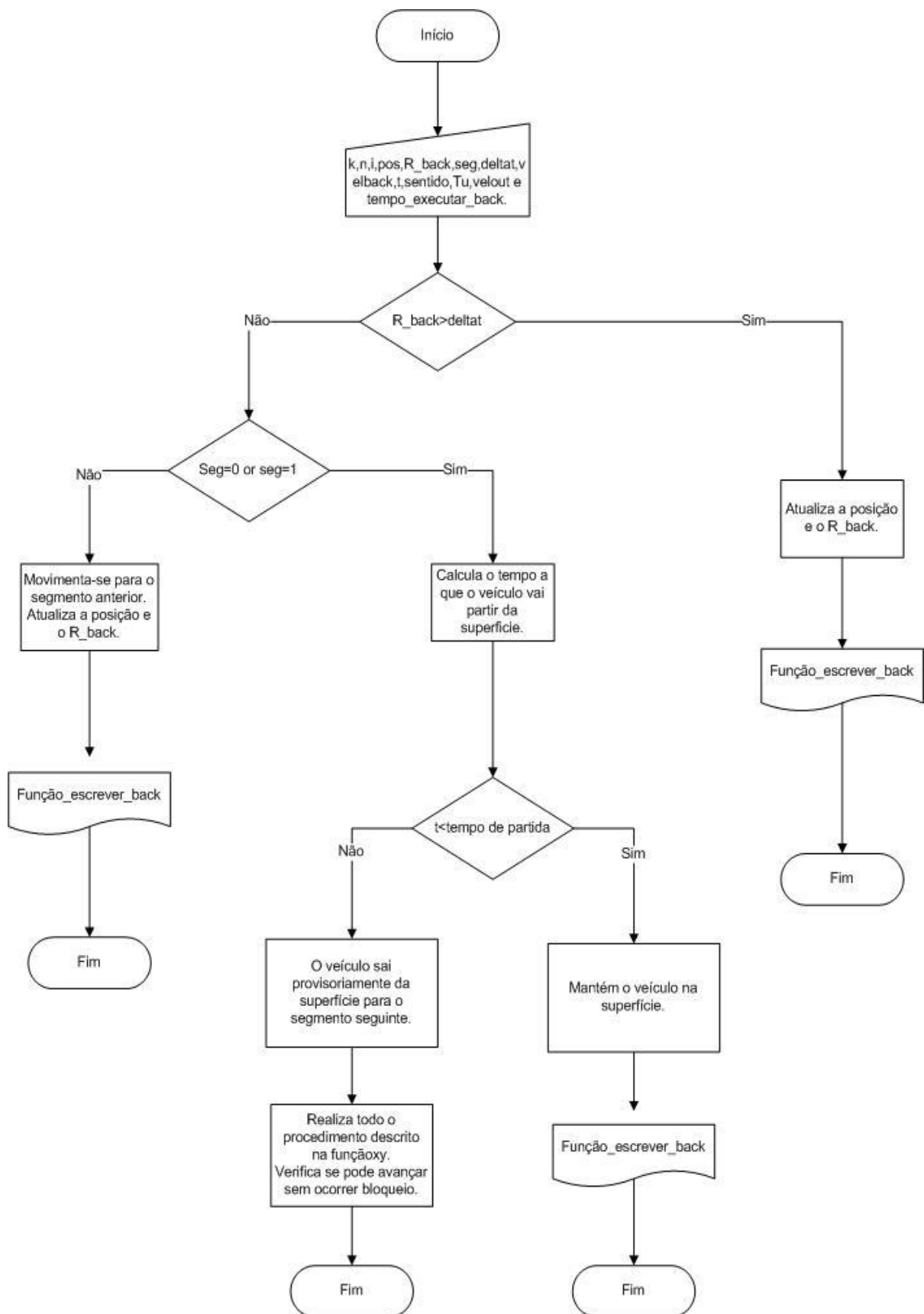


Figura 3.9. Fluxograma do movimento de veículos no sentido back.

A Figura 3.9 descreve como o simulador procede para realizar o movimento de um veículo no sentido ascendente. O primeiro passo é verificar se o R_back (tempo que falta para completar o segmento) do veículo é superior ao $deltat$. Se essa condição se verificar atualiza-se a nova posição, o R_out e chama-se a função `escrever_back` para registar o movimento na folha definida para o efeito. Se tal não se verificar, o simulador vai verificar se o segmento é igual a zero ou a um é porque está a chegar à superfície, caso contrário é porque vai mudar para um novo segmento. No caso referido em último, os veículos no sentido *back* podem mudar de segmento sem fazer nenhuma verificação, uma vez que se assumiu que estes não podem parar depois de terem iniciado o movimento, tornando assim estes movimentos simples. Por outro lado, no que diz respeito aos veículos estarem a chegar à superfície outras considerações têm de se ter em conta. Assim que o veículo entra na superfície, é calculado o tempo de chegada e o tempo de partida deste. Quando o tempo de simulação for superior ao tempo de partida, o veículo vai poder sair da superfície para um novo segmento. Para isso, terá de recorrer à maioria do código implementado na função descrita na Figura 3.8, a fim de verificar se não existe bloqueio ao movimentá-lo para o primeiro segmento do túnel da mina.

As funções `escrever_out` e `escrever_back` encontram-se descritas na Figura 3.10.

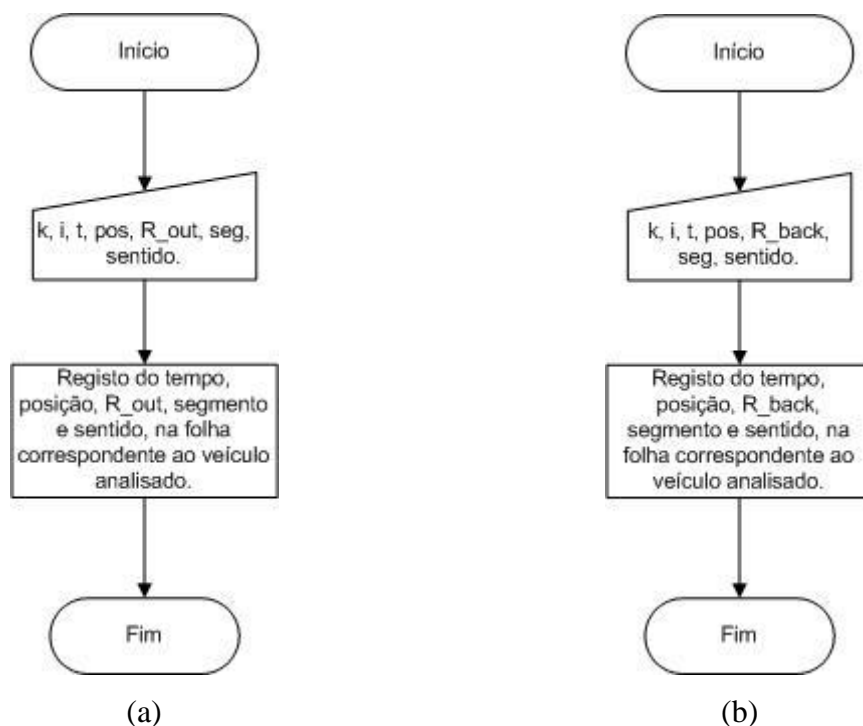


Figura 3.10. Funções para o registo das variáveis de estado: (a) Função `escrever_out`; (b) Função `escrever_back`.

Estes fluxogramas foram realizados com o objetivo de simplificar a dimensão do código, uma vez que estas linhas se iriam repetir inúmeras vezes. Assim, conseguiu-se facilmente agregar toda a informação necessária para o registo real do movimento recorrendo à utilização destas funções. Após a criação das mesmas tornou-se mais fácil localizar a informação desejada.

4. RESULTADOS

É visível no Gráfico 4.1 e no Gráfico 4.2 o resultado da integração de todas as funções descritas no capítulo anterior, ou seja, encontra-se exposto o movimento de um conjunto de veículos no interior de uma mina subterrânea. Esse movimento é descrito desde a superfície até ao carregador e do carregador à superfície.

Estes gráficos representam o movimento de seis veículos, cada um representado por uma cor diferente, em que o eixo horizontal representa o tempo que os veículos estão a ser simulados e o eixo vertical representa a localização dos veículos no interior da mina. O veículo encontra-se no carregador assim que a sua localização atinga o valor de 200 m, comprimento da rampa, e encontra-se à superfície quando a localização atinge o valor de 0 m.

No Gráfico 4.1 é possível analisar, em detalhe, o início, na superfície, do movimento dos seis veículos no interior de uma mina subterrânea. Ao analisar este gráfico verifica-se que:

- Os veículos abandonam a superfície num avanço de tempo fixo, h , ou seja, o primeiro veículo abandona aos 0 segundos e os outros vão saindo da superfície de h em h segundos.
- Os veículos só se encontram nos locais apropriados para o efeito, ou seja, estes encontram-se na superfície, no carregador e na escapatória definida inicialmente aos 100 m.
- Os veículos não abandonam o carregador assim que completem o tempo de carregamento. Estes só partem do carregador após cumprir o tempo de carregamento, o tempo que têm de estar na fila de espera do carregador e após verificar que com esse movimento não ocorre bloqueio do sistema. Esta espera no carregador é representada, no gráfico, por linhas constantes aos 200 m. Pode-se observar, por exemplo, que o veículo seis ainda não reuniu as condições necessárias para abandonar o carregador.
- Os veículos saem da superfície após completarem o tempo de descarga e depois de verificar que podem abandoná-la de forma viável. Estes tempos

são representados no Gráfico 4.1 por linhas constantes que se encontram aos 0 m.

Com o avançar do tempo de simulação, o movimento dos veículos deixou de ser linear como se verificou no Gráfico 4.1. Por seu lado, o Gráfico 4.2 mostra como se alterou o movimento desses veículos. Ao analisar este gráfico, em detalhe, verifica-se que:

- Um veículo só abandona a superfície se não existir nenhum veículo no sentido ascendente no segmento para onde este se pretende deslocar.
- Os veículos esperam no local certo para que não ocorra bloqueio do sistema. Se um veículo *out* quiser entrar num segmento em que exista um veículo no sentido ascendente, este tem de esperar na escapatória. Isto, porque o veículo ascendente demora menos tempo a alcançar a escapatória do que o veículo a terminar o segmento em que pretende entrar.
- Os veículos ascendentes (*back*) nunca param o seu movimento. Assim que saem do carregador nunca param até alcançar a superfície da mina.

Inicialmente definiu-se um conjunto de requisitos e políticas operacionais para a realização deste modelo. Pode-se concluir que o modelo cumpre todos esses requisitos impostos.

Assim, pode-se afirmar que o modelo de simulação pode ser aplicado, uma vez que não ocorre bloqueio, ou seja, o modelo de simulação estudado é viável. Muitas alterações poderão ser feitas a este modelo de forma melhorar o sistema como minimizar o tempo de execução da viagem, conduzindo assim a uma maior produtividade do sistema.

Gráfico 4.1 Movimento inicial dos seis veículos numa mina subterrânea.

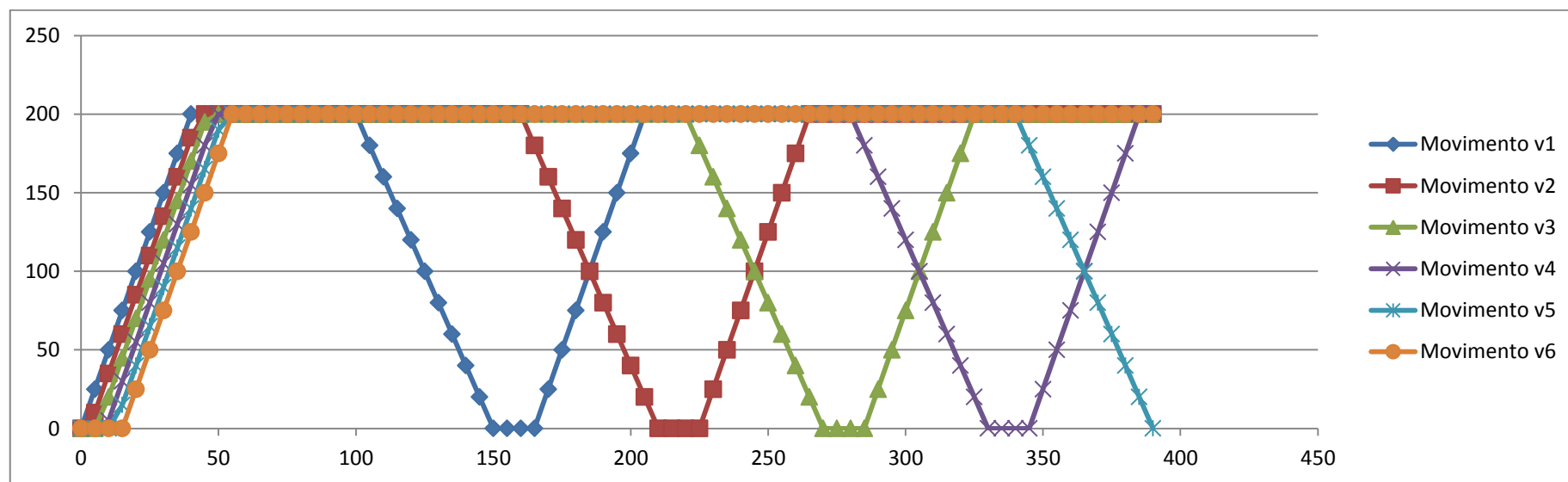
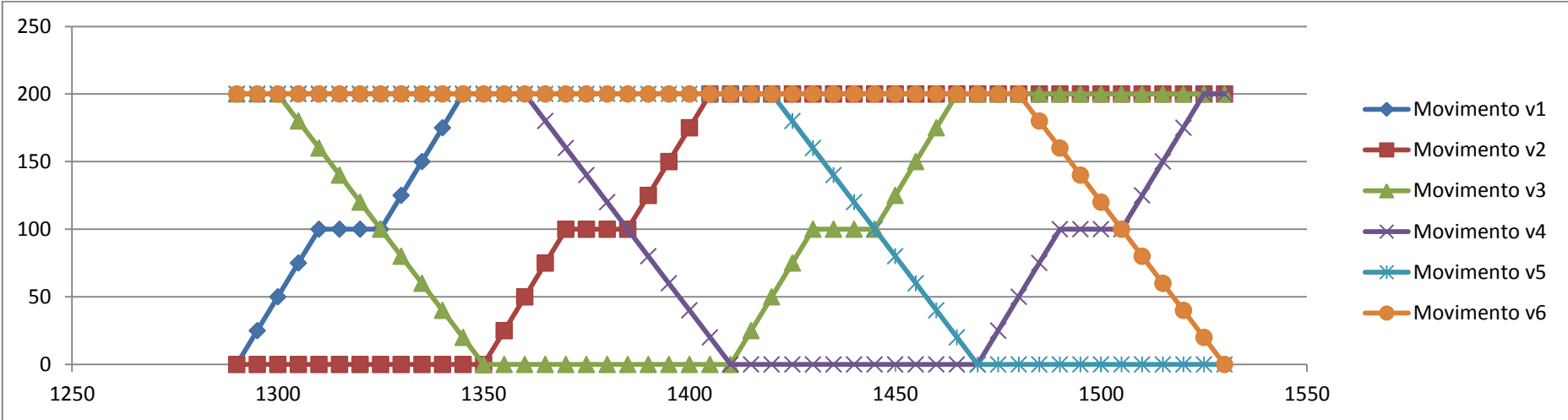


Gráfico 4.2 Detalhe do movimento dos veículos a meio do tempo de simulação.



5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. Conclusão

Esta dissertação foi assente num objetivo, que foi o de desenvolver um simulador de gestão de tráfego no interior de minas subterrâneas.

A fim de alcançar o objetivo proposto, definiram-se alguns pressupostos gerais relativamente ao funcionamento da mina e posteriormente recorreu-se ao Excel, utilizando como linguagem de programação o *Visual Basic For Applications* para modelar o movimento dos veículos no interior da mina.

Alguns constrangimentos foram sentidos nomeadamente, a dificuldade de acesso a dados reais, necessários para o modelo, e principalmente o fato de ser uma linguagem de programação que até ao momento não tinha sido estudada. Surgiram algumas dificuldades na utilização da linguagem, uma vez que era diferente da linguagem estudada, mas rapidamente foram superadas.

Pode concluir-se que o modelo construído de acordo com os pressupostos iniciais é um modelo viável porque não se encontram cruzamentos nem bloqueios do sistema, ou seja, nenhum veículo se encontra com outro sem ser nas escapatórias concebidas para esse efeito. Neste modelo é facilmente visível o movimento de cada veículo desde a superfície ao carregador e do carregador à superfície, uma vez que cada veículo se encontra diferenciado dos outros pela cor.

O modelo desenvolvido, para além de ser viável é também flexível, ou seja, permite que o utilizador possa facilmente alterar as características da mina e assim modelar de acordo com as suas necessidades e preferências.

Em virtude do que foi mencionado ao longo desta dissertação consegue-se perceber que “o modelo de simulação não nos resolve os problemas mas diz-nos como o sistema irá operar para um conjunto de parâmetros” (Sturgul, 2000). Assim, as decisões a serem tomadas cabem sempre ao utilizador, uma vez que estes modelos não têm em consideração estudos económicos e apenas testam as alternativas existentes.

5.2. Trabalhos Futuros

Todas as questões que ficaram em aberto no trabalho desenvolvido estão descritas posteriormente.

O modelo realizado descreveu unicamente o movimento dos veículos tendo em consideração as características gerais de uma mina subterrânea. Contudo, este modelo poderá ser melhorado de forma a estudar a melhor localização e o número de escapatórias por forma a aumentar o número de viagens realizadas por um veículo, ou seja, aumentar produtividade da mina, objetivo esse que é comum a todas as empresas.

O modelo desenvolvido poderá ser otimizado, uma vez que as velocidades dos veículos em cada sentido são velocidades constantes e médias, no entanto este sistema pode ser modelado com velocidades não constantes de acordo com o esperado. Assim, a velocidade iria aumentar desde a entrada de um segmento até atingir um máximo e posteriormente diminuiria assim que se pretendesse mudar de segmento.

Com o desenvolvimento deste modelo e com a realização da proposta dos trabalhos futuros é possível perceber exatamente o mecanismo de funcionamento de uma mina subterrânea e os parâmetros necessários pelo que, posteriormente, poderá ser possível passar de uma linguagem de programação comum para uma linguagem de simulação mencionada anteriormente.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anjomshoa, H. (2011). *Optimal Placement Of Passing Bays In Underground Mines*. University of South Australia.
- Caxaria, C. (2012). Exploração de Minérios em Portugal. *Ingenium*, 36-37.
- Higgins, A., Kozan, E., & Ferreira, L. (1996). Optimal Scheduling Of Trains On a Single Line Track. *Transportation Research Part B*, 30(2), 147-161.
- Higgins, A., Kozan, E., & Ferreira, L. (1997). Modelling the number and location of sidings on a single line railway. *Computers and Operations Research*, 24(3), 209-220.
- Hodkiewicz, M., Richardson, S., & Durham, R. (2010). Challenges and Opportunities for Simulation Modeling Integrating Mine Haulage and Teuck Shop Operations. *2010 Australian Mining Technology Conference*, (pp. 163-172).
- Kolonja, B., Kalasky, D., & Mutmansky, J. (1993). Optimization of Dispatching Criteria For Open-pit Truck Haulage System Design Using Multiple Comparisons With The Best And Common Random Numbers. *Proceedings of the 1993 Winter Simulation Conference*, (pp. 393-401).
- Martins, L., & Carvalho, J. (2007). Passado, Presente e Futuro da Indústria Extrativa em Portugal. *A Indústria Mineira: Passado e Futuro*. Auditório da Universidade de Coimbra.
- Seco, S. (2011). *Simulação de Transportes numa Mina Subterrânea*. Coimbra: Faculdade de Ciências e Tecnologias - Universidade de Coimbra.
- Soares, A. (2014). *Sequenciamento de Operações de Transporte em Rampas de Acesso a Minas Subterrâneas*. Coimbra: Faculdade de Ciências e Tecnologias - Universidade de Coimbra.
- Sturgul, J. (2000). *Mine Design: Examples Using Simulation*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
- Vagenas, N., Oldenburg, M., & Clément, S. (1996). 3-D Visualization and Simulation Modelling of Underground Hard Rock Mining Operations. *Proceedings of the 1st International Symposium on Mine Simulation* , (pp. 1-9).