FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Simulação de Transportes numa Mina Subterrânea

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

Autor

Sílvia Maria Pedrosa Seco

Orientador

Cristóvão Silva

Júri

Presidente	**Professora Doutora Marta Cristina Cardoso de Oliveira** **Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra**
Vogais	**Professor Doutor Cristóvão Silva** **Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra** **Professor Doutor José Luís Ferreira Afonso** **Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra**

Coimbra, Setembro, 2011

"É sempre prudente olhar em frente, mas é difícil olhar
para mais longe do que se pode ver."

Winston Churchill

À minha família

Agradecimentos

Finalizada uma etapa particularmente importante da minha vida, não poderia deixar de expressar o mais profundo agradecimento a todos aqueles que me apoiaram nesta caminhada e contribuíram para a realização deste trabalho.

Ao Professor Doutor Cristóvão Silva, o meu maior agradecimento por toda a disponibilidade e orientação prestada, pelo apoio e compreensão que sempre manifestou.

À minha família, agradeço pelo amor incondicional, pelo apoio e coragem que sempre me transmitiram.

À Sara Cordeiro, pela compreensão, dedicação e apoio nos momentos mais difíceis.

Resumo

Num mundo cada vez mais competitivo, a importância da estratégia e planeamento das actividades nucleares duma indústria é imprescindível. Na indústria mineira esse planeamento faz bastante sentido, já que acarreta avultados custos na sua actividade.

Este trabalho consiste no estudo de dois modelos que permitem conhecer o desempenho dos transportes numa mina subterrânea. Dado que os transportes se apresentam como uma actividade com uma importância vital na indústria extractiva, a gestão deste recurso poderá fazer a diferença quando se pretende ter custos unitários mais reduzidos.

Este estudo foi feito com recurso a um programa de simulação, o SIMUL8, de forma a ter uma visão mais analítica dos dois modelos e poder chegar à conclusão se a aplicação de algum destes modelos é pertinente para este caso em concreto.

Palavras-chave: Mina subterrânea, Simulação, SIMUL8, Transportes, Minério, Produtividade.

Abstract

In an increasingly competitive world, the importance of strategy and planning activities of a nuclear industry is essential. In the mining industry that planning makes perfect sense, since it entails huge costs on their business.

This work is a study of two models that allow to know the performance of an underground mine transport. Given that transport is presented as an activity of vital importance in the industry, the management of this resource can make the difference when you want to have lower unit costs.

This study was done using a simulation program, the SIMUL8, to take a more analytical view of the two models and be able to conclude whether the use of any of these models is relevant to this particular case.

Keywords Underground Mine, Simulation, SIMUL8, Transports, Ore, Productivity.

Índice

Índice de Figuras v
Siglas vi
1. INTRODUÇÃO 1
1.1. Depósitos minerais 2
1.2. Importância da indústria mineira em Portugal 3
1.2.1. Minas Neves-Corvo (Somincor) 3
2. Descrição do Problema 6
2.1. Lombador - nova frente de extracção 6
2.2. Decisões estratégicas e tácticas 9
2.2.1. Decisões estratégicas 9
2.2.2. Decisões tácticas 10
3. Revisão bibliográfica 11
3.1. Planeamento em minas subterrâneas 11
3.2. Alguns estudos em minas 12
3.3. Simulação na indústria mineira 14
4. Modelos estudados 15
4.1. Mod.1 16
4.1.1. Exposição da simulação do modelo 16
4.2. Mod.2 20
5. Resultados 22
5.1. Mod.1 22
5.2. Mod.2 22
6. Conclusões 23
7. Referências bibliográficas 24
8. Anexo A – Resultados retirados do simulador do mod.1. 26
9. Anexo B – Resultados retirados do simulador do mod.2. 27

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localização da Mina Neves-Corvo e Faixa Piritosa Ibérica. (fonte LNEG) 4
Figura 2. Projecto rampa do Lombador. (fonte SOMINCOR)..... 7
Figura 3. Pormenor da rampa do Lombador (fonte SOMINCOR) 8
Figura 4. Detalhe mostrando retiros e zonas de cruzamento. (fonte SOMINCOR)..... 8
Figura 5. Esquema simplificado do Mod.1. 15
Figura 6. Esquema simplificado do Mod.2. 16
Figura 7. Representação do trajecto em sentido descendente. (Simul8) 17
Figura 8. Representação do trajecto em sentido ascendente. (Simul8) 17
Figura 9. Esquema de utilização dos recursos no modelo……18
Figura 10. Simulador do Mod.1. (Simul8) 19
Figura 11. Esquema visível para o utilizador Mod.1. (Simul8) 20
Figura 12. Simulador do Mod.2. (Simul8) 20
Figura 13. Esquema visível para o utilizador Mod.2. (Simul8) 21

SIGLAS

LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia

1. INTRODUÇÃO

O objecto deste estudo é o transporte de minerais numa mina subterrânea, com o objectivo de aumentar o número de unidades de minério que saem da mina.

Esta tese insere-se num projecto mais vasto cujo objectivo consiste no desenvolvimento de um sistema de apoio à decisão na elaboração de planos de trabalho diário para veículos a circular em minas subterrâneas, e definição das rotas a executar para garantir o cumprimento deste plano. Esse projecto mais vasto será realizado no âmbito de uma Tese de Doutoramento onde serão desenvolvidos algoritmos necessários ao planeamento pretendido que terão de ser testados por simulação. Com este trabalho pretende-se dar um primeiro passo no desenvolvimento de modelos de simulação de tráfego no interior de minas subterrâneas. Nesse sentido, pretende-se desenvolver um modelo que permita estudar a actividade dos transportes numa mina com o objectivo de retirar maior quantidade de minério, reduzindo os custos associados ao transporte.

A indústria mineira é uma actividade de grande importância para a manutenção e progresso das sociedades modernas em que vivemos. Muitos produtos e materiais que utilizamos e desfrutamos frequentemente provêem da actividade mineira, esta muitas vezes é vista de forma negativa devido aos inúmeros impactos que pode ter no meio ambiente, e pelos vários acidentes que existiram ao longo dos tempos, no entanto, é facto que a inexistência desta actividade industrial apresentaria problemas à sociedade actual. É relevante referir que os recursos mineiros são finitos e nem sempre aproveitados convenientemente, existindo actividade mineira por explorar.

1.1. Depósitos minerais

"Entende-se por depósitos minerais todas as ocorrências minerais existentes em território nacional e nos fundos marinhos da zona económica exclusiva que, pela sua raridade, alto valor específico ou importância na aplicação em processos industriais das substâncias nelas contidas, se apresentam com especial interesse para a economia nacional", segundo o n.º 1 do artigo 2º do decreto-lei n.º 90/90, de 16 de Março.

Segundo a alínea c, do n.º 1, do artigo 84.º da Constituição da República Portuguesa, "os jazigos minerais, as nascentes de águas mineromedicinais, as cavidades naturais subterrâneas existentes no subsolo, com excepção das rochas, terras comuns e outros materiais habitualmente usados na construção" pertencem ao domínio público.

O decreto-lei n.º 88/90, de 16 de Março desenvolve os princípios orientadores do exercício das actividades no que concerne aos depósitos minerais, com vista ao racional aproveitamento técnico-económico e valorização, de acordo com o conhecimento técnico-científico já adquirido e os interesses da economia nacional. Neste diploma podem ler-se várias definições para os efeitos do diploma, mas que podem servir para melhor inserir a temática a que nos referimos. Segundo este diploma, mina é o conjunto do depósito mineral objecto de concessão, dos anexos mineiros, das obras e dos bens imóveis afectos à exploração. O minério é a substância mineral cuja existência fundamente a concessibilidade de depósito mineral, o produto da sua extracção (minério bruto) ou o produto da sua valorização mineralúrgica (minério beneficiado). A mineralurgia, por sua vez, é a actividade ou conjunto de operações que têm por fim a valorização do minério bruto, tendo em vista a sua preparação para venda ou utilização.

No âmbito da concessão da exploração, capitulo III do diploma acima alínea c, do n.º 2 do artigo 27.º, o plano de lavra deverá conter a descrição do sistema de transporte. Segundo o elenco dos anexos mineiros, artigo 36.º, os sistemas de transporte mineiro, tanto terrestre como fluviais ou aéreos, são considerados anexos mineiros. Sendo que, são considerados anexos mineiros as instalações, oficinas ou complementares da exploração, situem-se ou não dentro da área demarcada.

1.2. Importância da indústria mineira em Portugal

Segundo Delfim de Carvalho, Presidente da EDM – Empresa de Desenvolvimento Mineiro, numa entrevista em 2005, "a actividade mineira, continua inequivocamente, a ser um importante pilar da economia nacional". A indústria mineira tem uma importância relevante na economia "pelo seu contributo na exportação e no emprego" e "é dela que provêm as matérias-primas para alimentar vários segmentos da indústria transformadora e da construção civil no nosso País. Por outro lado as explorações mineiras, entendidas em sentido lato, situam-se um pouco por todo o território, muitas vezes em zonas deprimidas do interior profundo onde as alternativas de emprego são escassas ou nulas daí que, mesmo as de reduzida dimensão revestem-se do maior interesse".

1.2.1. Minas Neves-Corvo (Somincor)

A Somincor – Sociedade de Neves-Corvo, SA, foi constituída em 24 de Julho de 1980, após a descoberta em 1977, de um depósito de sulfetos maciços com quantidades significativas de metais básicos, principalmente de cobre e zinco.

A Mina de Neves-Corvo é uma mina subterrânea com excelentes infra-estruturas (caminho-de-ferro, auto-estrada, energia, operações portuárias e aeroportos), encontra-se a 220 km de Lisboa e a 100 km de Faro, situa-se no Baixo Alentejo, no bordo sul da Faixa Piritosa Ibérica (figura 1). A mina tem sido um importante produtor de cobre desde 1989 e em 2006 iniciou o tratamento de minérios de zinco. O processamento de minérios ricos em zinco foi suspensa em Novembro de 2008 na expectativa de uma melhora nos preços e foi reiniciado com uma taxa limitada em 2010.

A Somincor foi vendida à Eurozinc em Junho de 2004 e desde Novembro de 2006, integra o Grupo LUNDIN.

O Jazigo de Neves-Corvo é constituído por cinco massas de sulfuretos maciços Neves, Corvo, Graça, Zambujal e Lombador.

As expectativas de crescimento podem-se caracterizar essencialmente, por um maior aproveitamento dos recursos naturais e materiais, um volume de investimento considerável, a aposta em novas zonas de prospecção e em estudos de viabilidade para o Projecto do Lombador e expansão da Lavaria de Zinco.

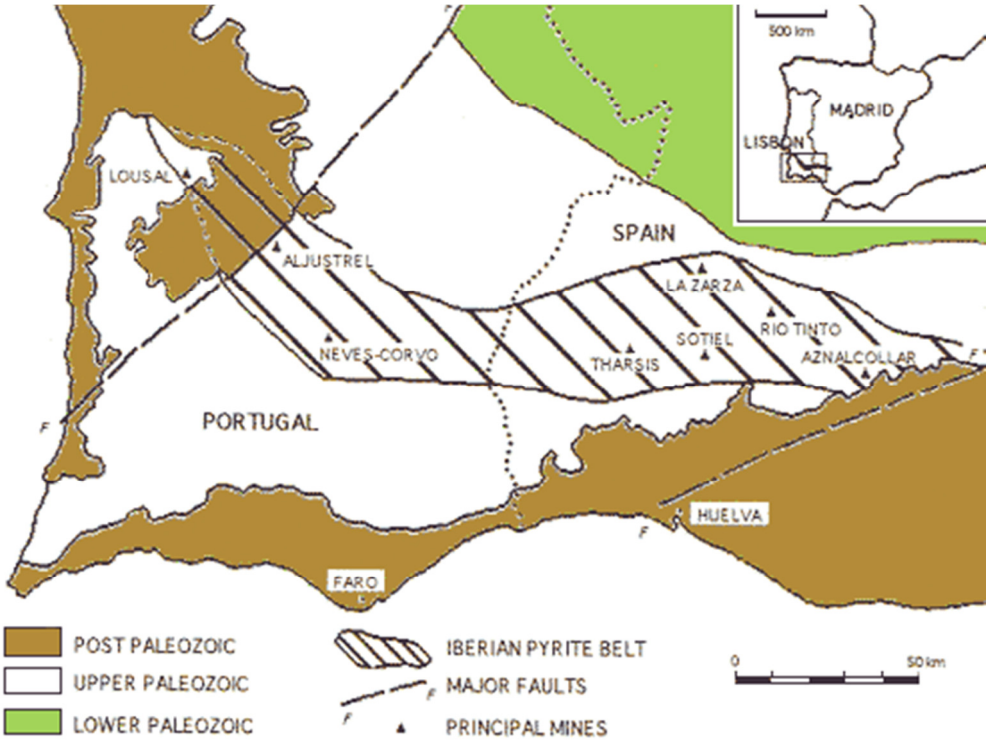


Figura 1. Localização da Mina Neves-Corvo e Faixa Piritosa Ibérica. (fonte LNEG)

A mina de Neves-Corvo tem um jazigo mineral atípico, quer em quantidade, quer em qualidade (cobre, estanho e zinco), o que a torna numa mina com características excepcionais. O projecto das minas utiliza a tecnologia mais avançada permitindo alta rentabilidade e custos competitivos, esta mina tem ainda um impacto favorável na região onde se situa, com forte empenho na segurança e bem-estar das pessoas e na protecção do ambiente.

A Empresa Somincor emprega cerca de 1300 trabalhadores (directos e indirectos). Cerca de 90% são provenientes da região envolvente (Castro Verde, Almodôvar, Aljustrel, Ourique e Mértola). É previsível que no futuro as necessidades de pessoal aumentem como consequência da viabilidade do Projecto do Lombador. Por outro lado o rejuvenescimento do quadro de pessoal também levará a carências de pessoal.

No que diz respeito a lucros operacionais a 31 de Dezembro de 2010, a mina Neves-Corvo teve um ganho operacional de 332,7 milhões de dólares, superior em 69,3 milhões de dólares em relação a 2009. A valorização do metal e as taxas de câmbio favoráveis compensaram, parcialmente, o menor volume de vendas. Os custos unitários foram mais elevados e estimou-se que houve uma redução de produção de cobre na ordem

das 10 mil toneladas. A produção de cobre situou-se abaixo dos valores esperados devido à limitação da moagem resultante de fortes chuvas. Com todas as linhas em execução no minério de cobre, o zinco produzido no quarto trimestre de 2010 veio apenas da recuperação no circuito de tratamento de rejeitos na planta de cobre. Os custos foram os previstos, os mais elevados foram resultado principalmente da acção industrial do primeiro trimestre, em que houve um menor volume de produção de cobre, tratamento de minérios de baixa qualidade e os esforços para recuperar a produção perdida de metal, estes foram compensados, parcialmente, pelo facto do euro estar mais fraco e pelo maior crédito de subprodutos.

O projecto de expansão de zinco em Neves-Corvo, projectado para produzir no mínimo 50 mil toneladas por ano, está a avançar dentro do cronograma. O custo estimado para este projecto é de 43 milhões de euros e está concluído em cerca de 70%.

2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O trabalho efectuado está associado a um caso de estudo, a nova frente de extracção das minas do Lombador.

A complexidade do problema de transporte nas minas é colossal, a existência de uma grande quantidade de vias de comunicação entre os vários pontos da mina torna difícil o transporte dentro da mina. Neste sentido, é importante haver uma planificação da forma como os transportes se processam dentro da mina, por forma a minorar os custos e a aumentar a quantidade de minério extraída, e assim a produtividade. O custo com os transportes e o tempo despendido pelos mesmos numa mina influenciam economicamente a sua viabilidade, sendo que, o seu planeamento é bastante importante.

2.1. Lombador - nova frente de extracção

O jazigo do Lombador insere-se dentro da concessão das minas Neves-Corvo e é uma massa mineralizada com minérios de zinco, chumbo e prata que foi descoberto em 1988. Serão investidos no projecto do Lombador 140 milhões de euros nos próximos três anos, segundo a publicação do jornal "Alentejo Popular" no seu sítio na internet a 10 de Fevereiro de 2011. Na mesma notícia pode ler-se que o projecto se encontra numa fase de estudo final de viabilidade. Segundo o responsável o projecto, que poderá criar entre 75 e 150 novos postos de trabalho, inclui a abertura de novas rampas (num total de 12 km), galerias de acesso ao jazigo e ainda a instalação de novos equipamentos nas lavarias, o que permitirá o aumento de tratamento anual de minério de zinco. Com este projecto prevê-se um aumento das exportações da Somincor.

A concessionária da mina Neves-Corvo pretende com este projecto prolongar a vida útil do complexo até 2030.

Como se pode verificar na figura 2, a rampa do Lombador é bastante complexa (apesar de não ser completamente evidente pela qualidade da imagem), esta serve apenas para expor a nova frente de extracção, e daí ser perceptível o grau de dificuldade na simulação de transportes para este projecto em particular.

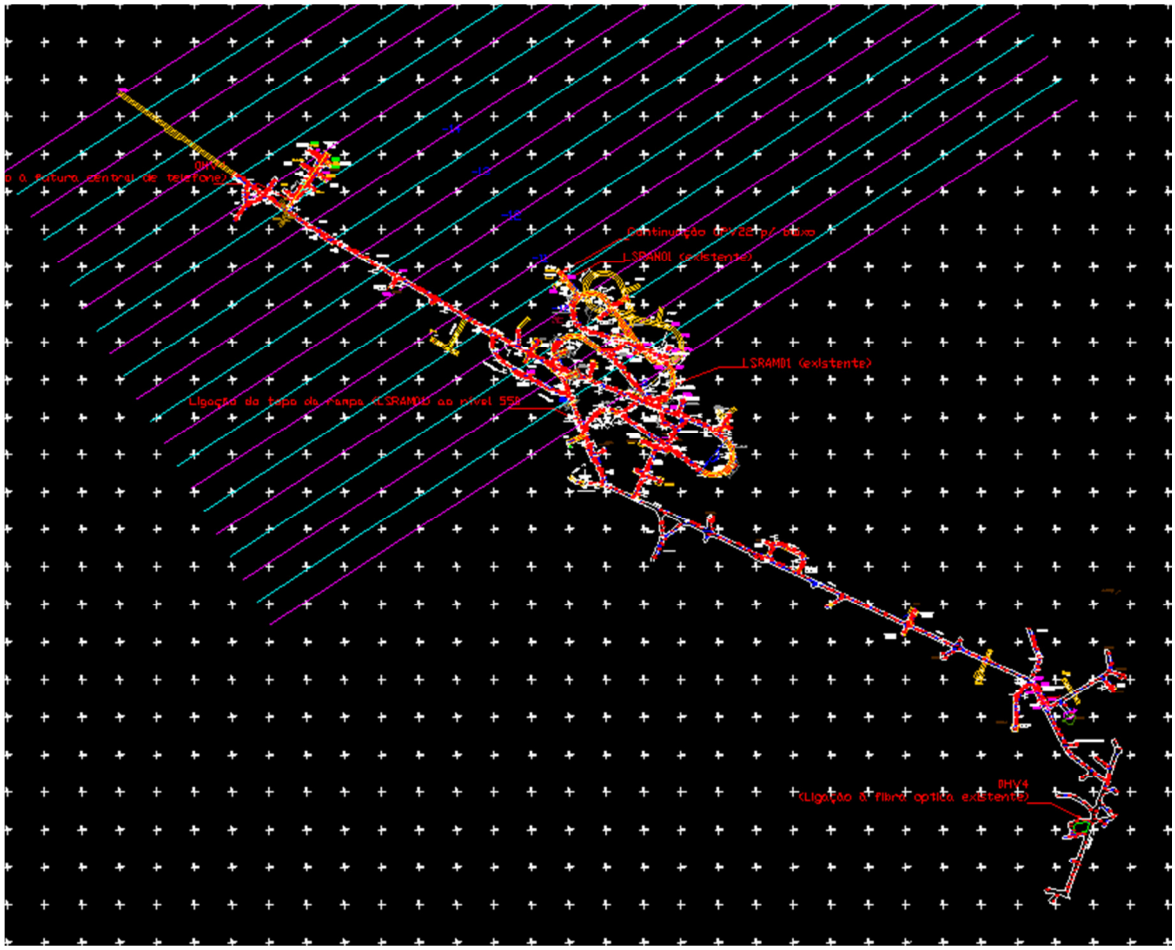


Figura 2. Projecto rampa do Lombador. (fonte SOMINCOR)

A figura 3 é uma imagem mais detalhada da rampa. Esta apresenta a mina mais pormenorizadamente, onde se pode ver a azul a rampa que dá acesso à zona de extracção, que se encontra a rosa. Como se pode verificar, existem retiros e cruzamentos para acesso à zona de extracção.

Esta imagem mostra de forma mais minuciosa parte da rampa mostrada na figura 2, onde se pode confirmar a complexidade já atrás referida.

Elaborar um sistema de transportes para uma mina com esta complexidade exige um trabalho minucioso em todos os trajectos apresentados, para se poder atingir os objectivos propostos.

Na figura 4, é mais perceptível a existência de retiros e cruzamentos, a imagem expõe de forma ainda mais detalhada uma parte da mina. Esta imagem serve para mostrar de forma clara uma pequena parte de um conjunto de retiros e cruzamentos ao longo de toda a mina.

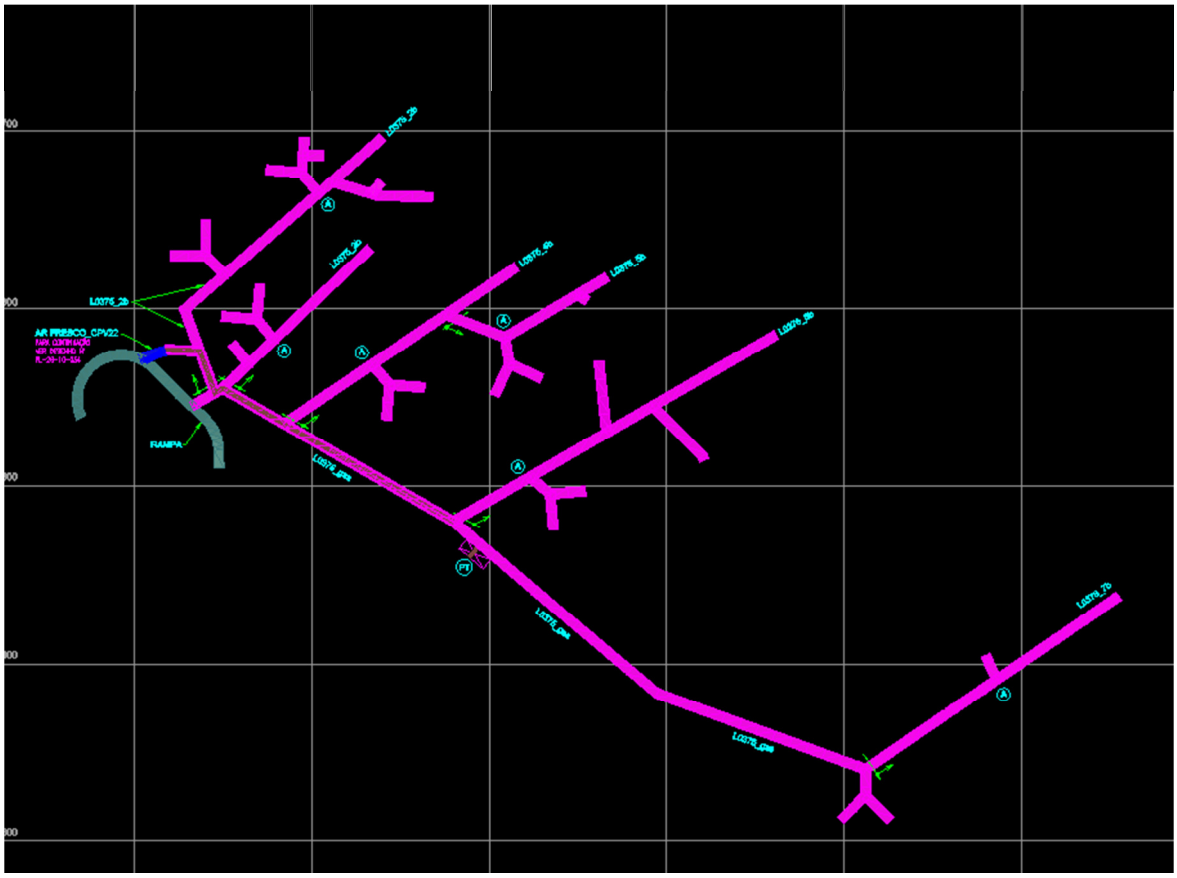


Figura 3. Pormenor da rampa do Lombador (fonte SOMINCOR)

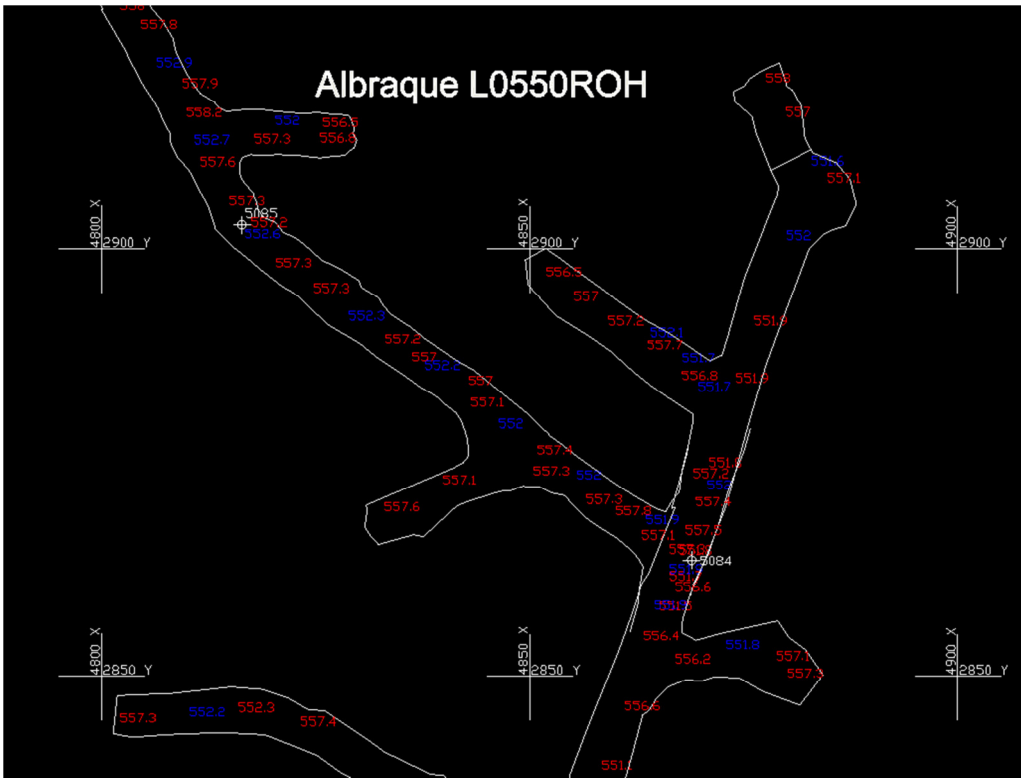


Figura 4. Detalhe mostrando retiros e zonas de cruzamento. (fonte SOMINCOR)

2.2. Decisões estratégicas e tácticas

É importante uma definição das decisões estratégicas e tácticas a serem tomadas. O objectivo como já foi referido atrás é aumentar o número de camiões que saem da mina carregados, pretendendo-se ter a quantidade de minério extraído máxima, diminuindo assim o custo unitário por cada unidade de minério extraído.

A decisão estratégica pensada para conseguir atingir o objectivo proposto, passa por existirem refúgios na rampa, para que os camiões não tenham que recuar uma grande distância o que os faria perder tempo e também eficácia. O tempo de transporte dentro da mina tem um grande impacto na produtividade, uma vez, que quanto mais tempo demorar um camião a chegar carregado à saída da mina, menos minério é extraído. De forma a minimizar o impacto do transporte dentro da mina, uma das soluções pensadas, é então, a construção de refúgios ao longo da rampa que minimizem os tempos de chegada ao posto de carregamento e os tempos de saída da mina dos camiões carregados. A táctica usada para analisar a eficácia dos refúgios foi a simulação, onde se pretende simular o número de camiões carregados que saem da mina, tendo em conta a existência de um ou dois refúgios.

2.2.1. Decisões estratégicas

A definição das decisões estratégicas baseou-se no objectivo definido, o que se pretende é que o custo unitário de cada unidade de minério extraído seja o mais reduzido possível. Assim, através da gestão do tráfego dentro da mina pretende-se diminuir os custos de transporte, aumentando o volume de minério retirado, e consequentemente os custos unitários serão menores. A gestão de transportes numa mina não é tarefa fácil devido às várias restrições que são impostas, não só pelas infra-estruturas, como também pelo equipamento utilizado. A definição de uma estratégia deverá ser sempre bem analisada para que a estratégia a adoptar não seja um problema a longo prazo.

Neste problema em particular, a estratégia passou pela gestão adequada dos transportes, uma vez, que são o que nos permitem numa primeira análise reduzir custos.

O que acontece numa mina é que os túneis não são suficientemente largos para se cruzarem dois camiões, assim, sempre que um camião sobe carregado de minério, nenhum outro pode descer e vice-versa. A prioridade quando dois camiões necessitam de

fazer o percurso, em sentidos opostos, é sempre para o camião que está carregado, se eles se encontrarem a meio do percurso o camião vazio terá que recuar até permitir a passagem do camião carregado. Este procedimento leva a grandes custos não só com combustíveis, como também com o tempo gasto nas manobras. A estratégia a adoptar passa então pela gestão dos transportes dentro da mina. Mas como?

2.2.2. Decisões tácticas

Conhecendo a decisão estratégica é necessário planear para alcançar o objectivo de aumentar a produtividade.

Com o valor dos minérios em alta nos últimos anos, o objectivo principal é aumentar a quantidade de minério extraído, ao menor custo unitário possível, e assim aumentar as mais-valias. Quando existe investimento, é importante haver um planeamento eficaz e, é importante estudar as melhores formas de aplicar esses investimentos, minimizando os riscos. Um investimento avultado acarreta sempre um grande risco que pode ser minimizado com o planeamento correcto.

Neste caso o problema é conhecido, e foram pensadas formas para o resolver. Numa primeira abordagem ao problema a utilização de semáforos na mina foi o que ocorreu como sendo a solução mais apropriada a estudar, no entanto, a dificuldade em ter dados suficientes para elaborar um estudo correcto afastou essa ideia. Outras começaram a surgir para a resolução deste problema. A simulação foi o caminho a seguir.

Foram pensados dois cenários que serão testados por simulação, e comparados entre si.

O objectivo é compreender, até que ponto, os refúgios são uma mais-valia para a gestão dos transportes dentro da mina.

A tarefa de simular sem um conhecimento aprofundado de todos os parâmetros que envolvem o trabalho numa mina é bastante complicado, no entanto, os modelos criados pretendem ser uma base para um estudo mais completo e minucioso.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo o objectivo é apresentar uma breve revisão bibliográfica que contemple os principais conceitos e técnicas utilizadas para a realização deste trabalho. A busca de literatura para o apoio à resolução do problema em questão levou à divisão deste capítulo em três secções distintas, a secção (3.1) onde será abordado a importância de planeamento e a importância da sua flexibilidade nas minas subterrâneas, a secção (3.2) serão abordados os estudos elaborados por vários autores em minas e por último, a secção (3.3) onde será abordada a simulação e a sua aplicação na indústria mineira.

3.1. Planeamento em minas subterrâneas

Num mundo de crescente competição e incerteza, a flexibilidade operacional e a capacidade de adaptação estratégica são cada vez mais reconhecidas como fundamentais para o sucesso a longo prazo das empresas. O maior potencial de poupança está disponível durante a fase inicial de planeamento. A equipa de planeamento tem maior liberdade para explorar alternativas e avaliar riscos usando durante a sua análise critérios técnicos e económicos. Neste caso, a fase de planeamento é considerado o período entre o início do estudo de viabilidade e o início de produção na mina. As modificações deverão ser feitas quando há alterações em factores financeiros, técnicos ou sociais. Sendo que o objectivo último deverá ser aquele que maximiza os benefícios económicos provenientes da reserva de minérios (Kazakidis *et al*., 2003).

Segundo Pelley, (1994, cit. por Kazakidis *et al*., 2003) vários objectivos individuais devem ser considerados para se poder optimizar o plano de uma mina, e um deles é minimizar o custo por unidade extraída.

Krantz e Scott (1992, cit. por Kazakidis *et al*., 2003) num estudo de selecção do método de mineração salientam que num projecto de mineração a rendibilidade máxima é fortalecida pela flexibilidade do plano da mina e pela escolha dos métodos de mineração. A flexibilidade do plano deverá permitir que o método de mineração mesmo sendo alterado, possa ainda assim satisfazer os outros objectivos do projecto conforme o definido

pelo cronograma da produção, da análise económica, da mão-de-obra e equipamento disponível.

Singh e Rajala (1981, cit. por Kazakidis *et al*., 2003) indicam que o método de mineração escolhido deve ser suficientemente flexível para acomodar as limitações impostas pelas instalações existentes, tais como o desenvolvimento existente, o manuseio do minério, a compatibilidade com o cronograma da produção, os sistemas de enchimento e drenagem, assim como lidar com as diferentes condições geológicas.

Bharti *et al*. (1983, cit. por Kazakidis *et al*., 2003) dão relevância ao facto que as alternativas de mineração devem ser flexíveis pra lidarem com as condições do solo difícil e imprevisto. Mesmo havendo o reconhecimento da importância da flexibilidade no plano de uma mina, os meios disponíveis para avaliar o nível de flexibilidade de um plano são limitados (Kazakidis *et al*., 2003).

3.2. Alguns estudos em minas

Algumas empresas investigaram o uso de comboios rodoviários com o objectivo de aumentar a produtividade. Os comboios rodoviários para serem usados requerem baías de passagem. As baías de passagem deverão ter cerca de 20-30 m de comprimento para permitir a passagem dos comboios rodoviários. A produtividade é medida pela quantidade de material transportado por turno (Anjomshoa *et al*.,2010). Robert (2002, cit. por Anjomshoa *et al*.,2010) simulou as operações de uma mina com baías de passagem, mas não considerou a distância óptima entre elas. Chegou a conclusão que se o espaço entre as baías de passagem é pequeno existe um desperdício, porque requer um custo elevado para infra-estruturas adicionais, quando a distância é demasiado grande, despende-se muito tempo já que os comboios rodoviários descendentes esperam nas baías de passagem pelos ascendentes.

Num trabalho de simulação (Anjomshoa *et al*.,2010) propuseram-se a encontrar o espaçamento ideal entre essas baías de passagem, de modo a aumentar a produtividade. Para isso consideraram uma mina de declive único com 4-6 km de comprimento. Neste trabalho, os autores chegaram ao espaço crítico entre as baías. Na prática, o espaçamento deverá ser menor do que a distância crítica para lidar com as variações de duração das cargas e descargas. As baías, no entanto, nem sempre podem ser

localizadas onde é melhor para o transporte por causa de outras restrições, assim, a aplicação deste estudo a uma mina real deverá ter em conta todo o ambiente industrial e operacional.

Outros autores usaram a simulação para analisar sistemas de transportes em minas, como foi o caso de Glenn *et al.* (1993), estes autores usaram três modelos simples para analisar um sistema de transporte para convencer a gerência da *Cape Breton Development Corporation* que poderia melhorar o seu sistema de forma drástica, sem investimento de capital. O sistema de transporte de carvão a partir dos locais de armazenamento para o cais de embarque não estava a alcançar a sua taxa de transferência máxima. Ao seguir as recomendações a empresa tem aproximadamente o dobro de taxa de transferência neste sistema, o que leva a uma poupança de custos e a uma melhoria das oportunidades de mercado. A combinação dos modelos provou ser útil para melhorias do sistema de manuseio do minério e o modelo de programação tornou possível explicar os planos de gestão de pessoal e operacional, permitindo que houvesse uma participação com sugestões para a mudança.

Além da simulação, outras técnicas são usadas em minas subterrâneas como foi o caso de Newman *et al.* (2004) que desenvolveram um modelo de programação linear inteira mista para determinar uma sequência de tempo de extracção de minério numa mina subterrânea. O objectivo foi minimizar o desvio entre as quantidades de produção real e planeada, sujeito a restrições operacionais. Este foi um estudo feito nas minas Kiruna uma das maiores minas do mundo. O método utilizado foi resolver pequenos problemas agregados para restringirem o tamanho do modelo original. Vários foram os autores que obtiveram sucesso com o uso de modelos de programação inteira para determinar decisões de escalonamento de produção aplicada a cenários realistas de minas como o caso de Trout (1995) e Smith (1998) (cit. por Newman *et al.*, 2004).

O planeamento estratégico a longo prazo é essencial para as grandes minas subterrâneas, para melhor utilização dos recursos disponíveis. O procedimento usado, por agregação, leva a uma redução substancial do tempo de obtenção da solução sem perda de qualidade da mesma, o que facilita a rápida avaliação de estratégias alternativas de mineração (Newman *et al.,* 2004).

3.3. Simulação na indústria mineira

Um processo de decisão, dada a sua complexidade, carece de uma base científica, já que envolve factores subjectivos. Uma decisão não deve ser tomada só tendo por base experiências passadas. A simulação é um instrumento importante para auxiliar a tomada de decisões. Neste ponto são apresentados alguns pontos de vista de alguns autores em relação à aplicação da simulação na indústria mineira.

De acordo com Andrade (1990, cit. por Pinto, 2007), a pesquisa operacional fornece instrumentos científicos que auxiliam o processo de decisão. A simulação é uma técnica de pesquisa operacional, serve para analisar problemas complexos que seriam difíceis de obter através de uma solução analítica.

Segundo Paganiotou (1999, cit. por Rodrigues, 2006), os primeiros estudos de simulação em minas na Europa, foram os transportes em minas subterrâneas. Konyukh (1999, cit. por Rodrigues, 2006) refere que a simulação proporciona uma óptima oportunidade para analisar alterações nos sistemas de mineração. Knights et al. (1999 cit. por Rodrigues, 2006) relatam que a simulação pode ser utilizada para estudar o impacto de novas ideias nas operações das minas, tal como, testar novos procedimentos e normas. Através da simulação diferentes alternativas podem ser comparadas e podem ser também testadas novas ideias, sem que tenham que ser necessariamente aplicadas ao sistema real.

Saayman (2005) utilizou um modelo de simulação para avaliar estratégias de optimização de sistemas transportes em minas subterrâneas.

A simulação elaborada com recurso a animação é uma ferramenta que pode ser usada pelos engenheiros para convencer os responsáveis de uma mina que certas metas podem ou não ser atingidas. A existência de computadores de alto desempenho e baixos custos, disponíveis na maioria das minas, aliadas a linguagem de simulação, permitem a construção rápida de modelos e facilitam as alterações, tornando a simulação uma importante ferramenta na indústria mineira, segundo Panagiotou (1999, cit. por Pinto, 2007). Para Vagenas (1999 cit. por Pinto, 2007), a facilidade de uso de animação é a razão principal para o crescimento da popularidade da modelação por simulação na indústria mineira.

4. MODELOS ESTUDADOS

O estudo foi realizado através de simulação, o *software* utilizado foi o SIMUL8. Foram criados dois modelos a simular, para se obter resultados, e assim, se proceder à sua comparação.

Criar os modelos foi uma tarefa complicada, uma vez, que não foi possível recolher dados reais da mina, os dados utilizados foram dados fictícios só para a realização deste estudo. No entanto, tendo conhecimento dos dados reais, como sendo as distâncias, meios de transporte utilizados, tempos de carga e descarga, entre outros, basta aplicá-los aos modelos. A simulação não perde assim o seu interesse e a sua validade.

Tal como já se verificou atrás a mina é um sistema complexo com vários cruzamentos e refúgios, assim numa tese de mestrado com estas características e com o tempo disponível reduzido, tornava-se inexequível conseguir um modelo que nos permita estudar o sistema de transportes para o total da mina. Assim sendo, os modelos a estudar representam apenas troços de menor dimensão que dariam origem a um modelo completo e mais complexo, para toda a mina.

O primeiro modelo estudado (designado como Mod.1, a partir de agora), refere-se ao estudo do percurso com a existência de um refúgio a meio da rampa, onde podem interromper a viagem os camiões que descem, para que não haja necessidade de recuar até ao início do percurso. Os camiões que vêm carregados em sentido ascendente, têm sempre prioridade em relação ao que vão vazios no sentido descendente.

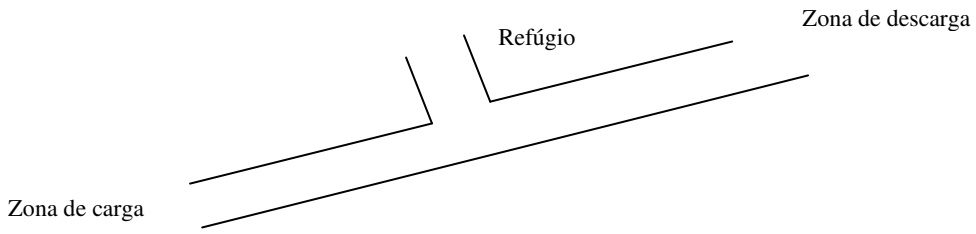


Figura 5. Esquema simplificado do Mod.1.

O segundo modelo estudado (designado como Mod.2, a partir de agora), refere-se ao percurso com dois refúgios, um a meio da rampa e outro, mais perto da zona de carga, onde podem parar os camiões, enquanto os outros seguem o percurso. Tal como no Mod.1 os camiões carregados têm prioridade em relação aos vazios que descem.

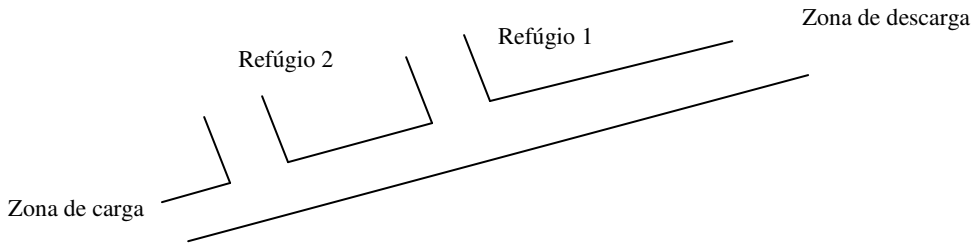


Figura 6. Esquema simplificado do Mod.2.

4.1. Mod.1

O Mod.1 foi o primeiro a ser simulado, utilizando o SIMUL8, como já foi atrás referido. Para esta simulação foram considerados tempos fictícios, não se teve em conta as distâncias reais, pela impossibilidade que houve de usufruir dessa informação. No que se refere aos transportes, foram considerados cinco camiões com as mesmas características, considerando-se a velocidade de subida inferior à de descida, pelo facto do camião no trajecto da subida estar carregado. De ressalvar que dentro de uma mina não circulam apenas camiões, circulam também outros tipos de veículos, impossíveis de distinguir pela falta de dados já referida. A simulação do modelo pretende ser um estudo que apesar de ter em conta características conhecidas do sistema, serve apenas como um caso de estudo, a ser mais aprofundado numa eventual tese de doutoramento, pelo facto de não serem usados dados concretos e reais. Este estudo serve de primeira abordagem a este problema.

4.1.1. Exposição da simulação do modelo

Foram considerados neste processo cinco camiões que nunca saem do sistema, este é portanto um sistema fechado, onde circulam sempre os mesmos veículos. O processo inicia-se com uma fila de espera, onde se encontram os cinco camiões considerados, numa primeira fase eles vão sair dessa fila de espera em sentido descendente até ao *work center 1*, esta parte representa a primeira parte do trajecto em sentido descendente. De seguida teremos uma fila de espera para o camião poder seguir o caminho para a segunda parte do trajecto (*work center 2*). Não havendo nenhum camião em sentido ascendente, o camião seguirá o seu caminho até ao *work center 4*, que representa o local onde será carregado.

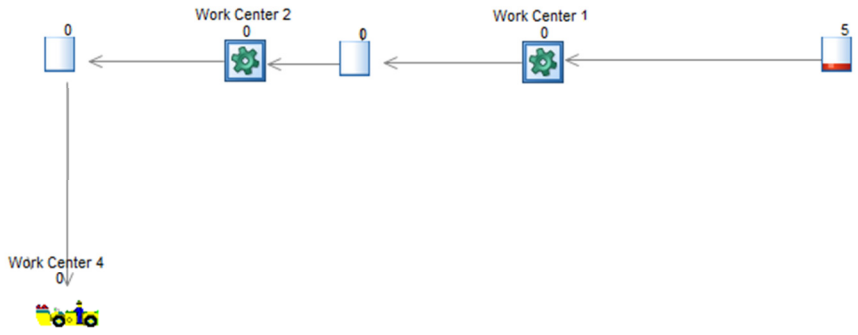


Figura 7. Representação do trajecto em sentido descendente. (Simul8)

Chegando o camião à zona de carga, depois de carregado, começa o percurso em sentido ascendente. O *work center 5* representa a primeira parte do trajecto em sentido ascendente, e o *work center 6* a segunda parte do trajecto em sentido ascendente. Depois daí o camião é descarregado e volta ao processo. O *work center 10* e *7* são postos de trabalho "fictícios" com tempo nulo. Como os camiões não se podem cruzar, foram criados estes postos de trabalho para auxiliar no processo de simulação.

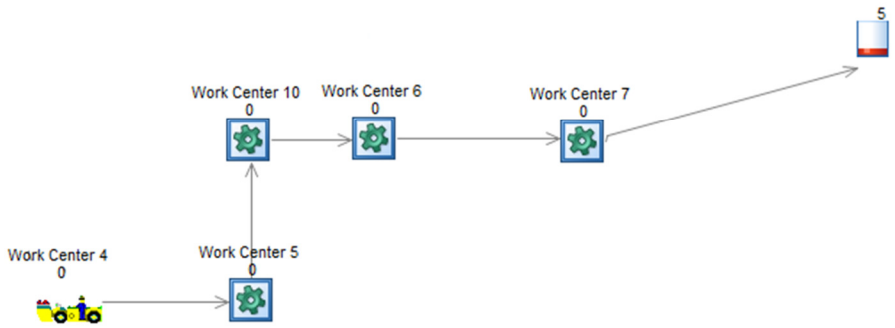


Figura 8. Representação do trajecto em sentido ascendente. (Simul8)

As unidades de tempo consideradas foram de 7 unidades de tempo até ao refúgio (*work center 1*) e outras 7 até à zona de carga (*work center 2*), no sentido descendente. Na zona de carga foram consideradas 12 unidades de tempo (*work center 4*) e em sentido ascendente considerou-se 10 unidades de tempo até ao refúgio (*work center 5*) e outras 10 até à saída (*work center 6*), uma vez que o camião carregado anda a velocidade mais reduzida e assim demora mais tempo na subida. O refúgio encontra-se então neste modelo sensivelmente a meio da rampa. Todos os outros postos de trabalho do processo têm unidades de tempo nulas.

Para que o simulador funcionasse como pretendido, sem que se verificasse o cruzamento de veículos na rampa, tiveram que ser usados quatro recursos, que sendo chamados a um determinado posto de trabalho (*work center)*, obriga os veículos que se encontram dependentes desse recurso no posto de trabalho a ficarem parados, ou no início da rampa ou no refúgio, até que esse recurso seja libertado novamente. Assim, os recursos utilizados foram de extrema importância neste processo. Na figura seguinte está representado um esquema, onde estão representados os postos de trabalho (*working centers*), de 1 a 11, duas filas de espera, e os recursos necessários para que o simulador funcione, correctamente, conforme o pretendido.

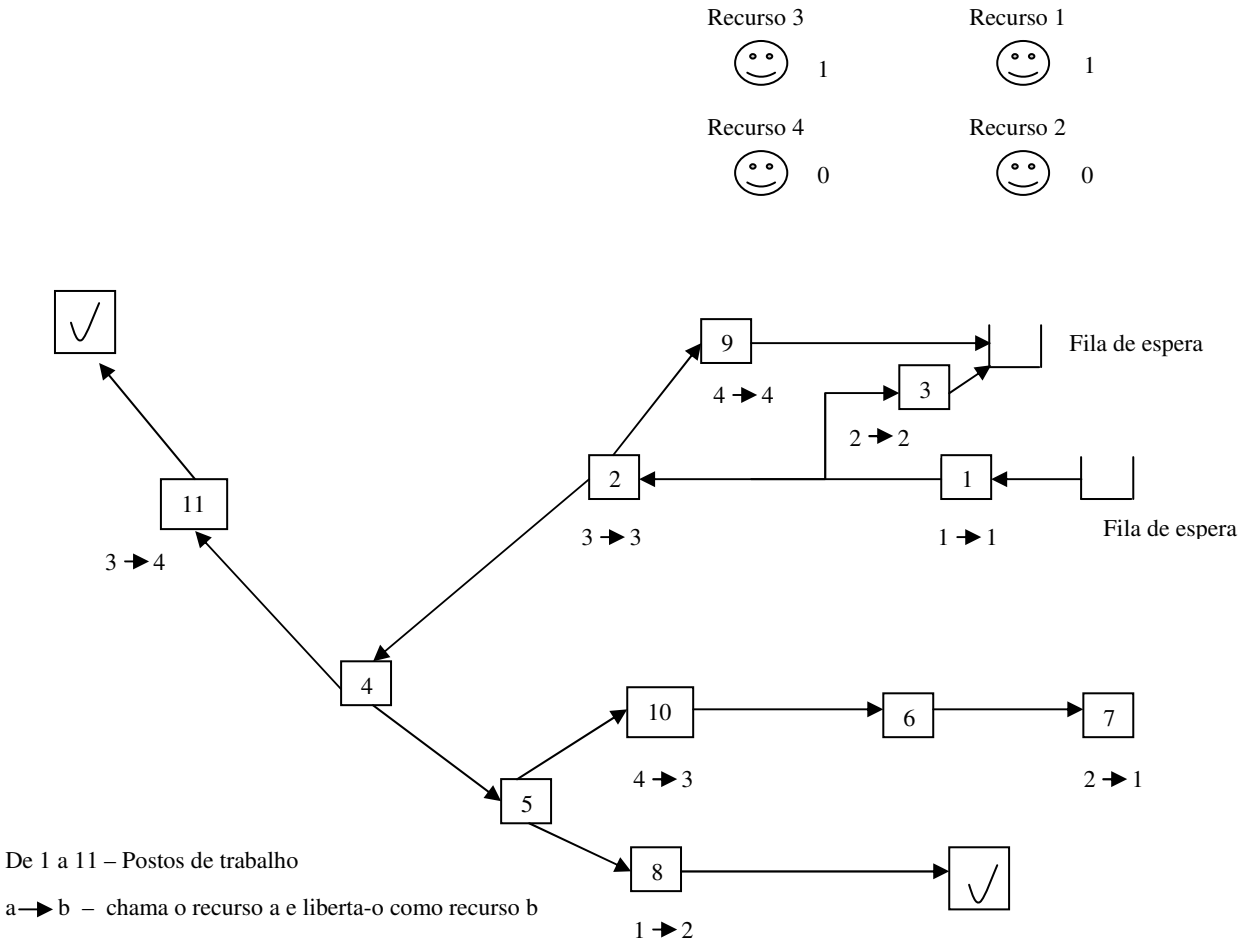


Figura 9. Esquema de utilização dos recursos no modelo.

O modelo para funcionar correctamente necessita de uma gestão dos recursos que permita atingir o objectivo desejado, assim, podemos verificar que no posto de trabalho 1 o recurso chamado é o recurso 1 e é libertado como recurso 1 na mesma, se o

recurso 1 for chamado para o posto de trabalho 8, indica que a rampa está a ser ocupada no sentido ascendente e assim nenhum camião pode descer, o recurso 1 só é libertado no posto de trabalho 7 quando o camião chega ao seu destino, e assim já pode ser utilizado no posto 1 o que permite que se houver algum camião para descer ele já poderá proceder à descida. O mesmo vai acontecendo com os outros recursos ao longo de todo o percurso.

Os recursos são muito importantes para o bom funcionamento do modelo. Não havendo uma utilização eficiente dos recursos, como a que existe, não seria possível o simulador funcionar correctamente.

4.1.1.1. Simulador

Na figura que se segue está representado o modelo simulado no SIMUL8. Aqui se pode verificar todo o trabalho realizado, ainda que de forma esquemática. As zonas que aparecem marcadas a tracejado indicam duas zonas criadas apenas para servirem de contador, assim, poderemos saber quantos camiões desceram para carregar e quantos iniciaram a subida para descarga. Esta contagem é possível, uma vez que, foi feito um *batching* igual a 2 nos postos 4 e 5, ou seja, sai para dois sítios a contagem dos veículos que passaram. Como o processo é fechado, e os veículos estão sempre dentro do modelo este *batching* permite saber quantos circularam nos postos de trabalho 4 e 5. Ou seja, quantos foram carregados e quantos iniciaram a subida.

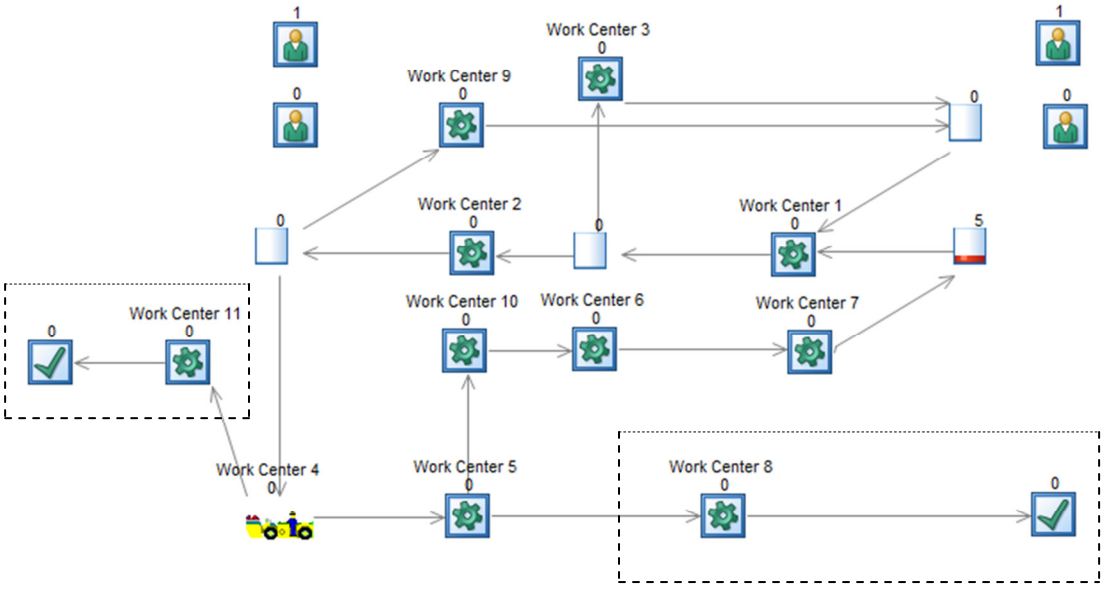


Figura 10. Simulador do Mod.1. (Simul8)

Na figura seguinte vê-se o modelo tal como aparece para o utilizador. A imagem é retirada do SIMUL8 depois de serem ocultadas as partes que não têm interesse para quem apenas quer saber como funciona e os resultados alcançados.

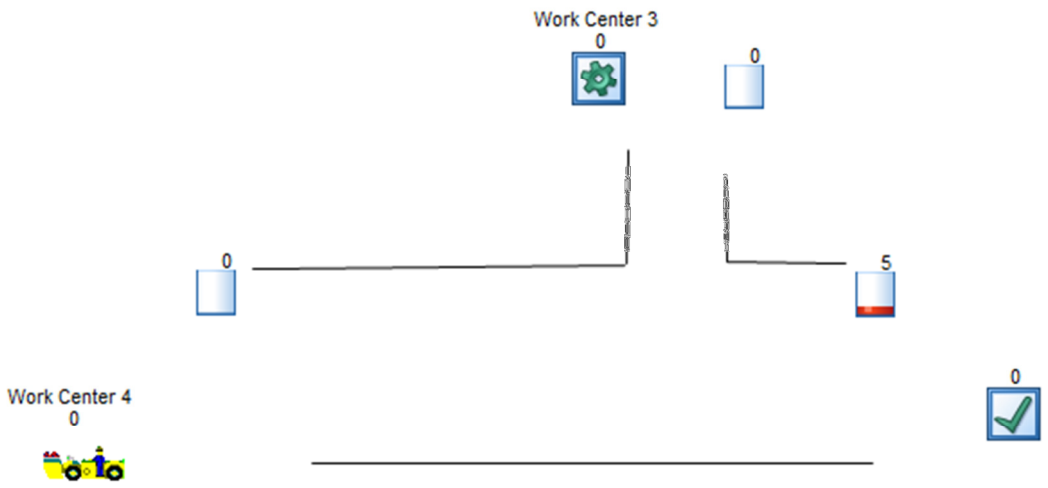


Figura 11. Esquema visível para o utilizador Mod.1. (Simul8)

4.2. Mod.2

O Mod.2 foi elaborado tendo por base o mesmo raciocínio, mas neste caso tendo em conta a existência de dois refúgios. A base da simulação é a mesma. Os recursos funcionam da mesma forma, só no *work center 9* há uma diferença, no caso de estar a subir um camião, o que estiver a descer não necessita de ir até ao primeiro refúgio (mais próximo da entrada), fica no segundo refúgio, e assim fica mais perto da zona de carga.

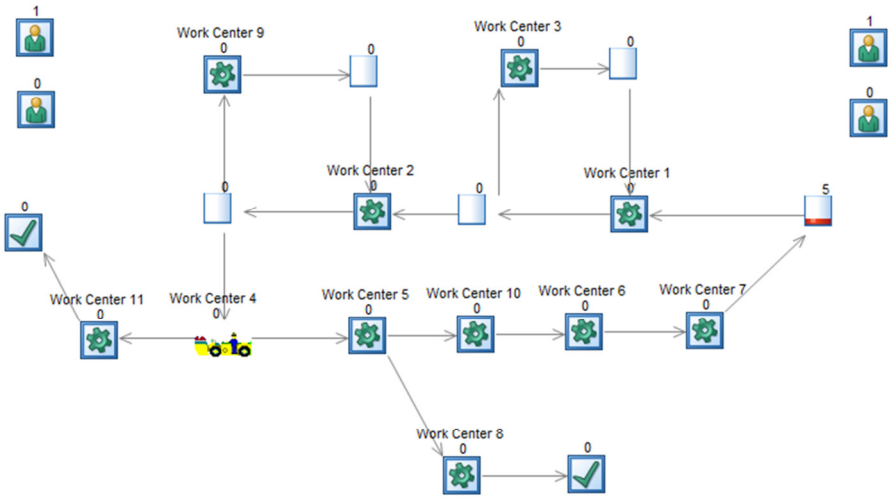


Figura 12. Simulador do Mod.2. (Simul8)

Na figura que se segue vê-se o modelo tal como aparece para o utilizador. A imagem é retirada do SIMUL8 depois de serem ocultadas as partes que não têm interesse para quem apenas quer saber como funciona e os resultados alcançados.

Nesta imagem o simulador já está em funcionamento daí aparecerem os camiões inseridos através de ferramentas de animação.

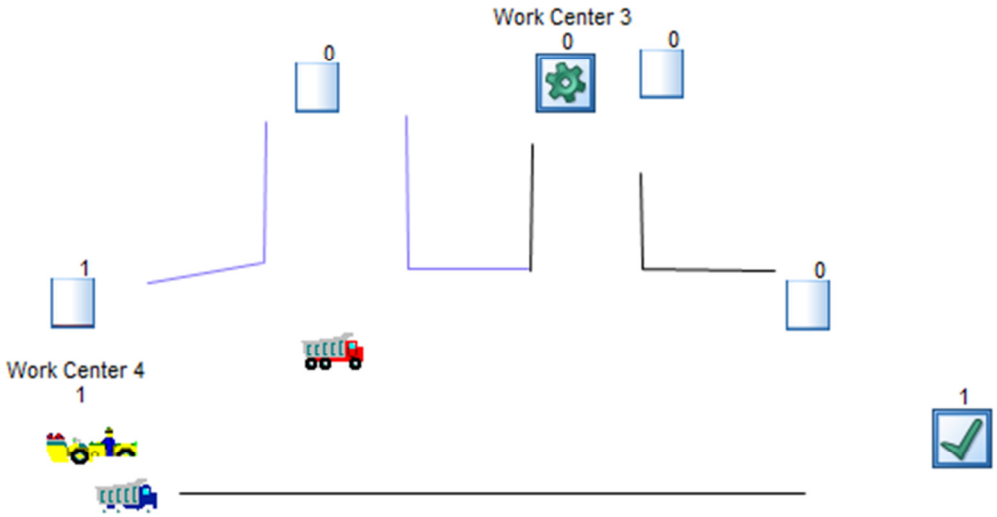


Figura 13. Esquema visível para o utilizador Mod.2. (Simul8)

5. RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos dois modelos. Foram consideradas 4600 unidades de tempo para "correr" o modelo.

5.1. Mod.1

Os resultados obtidos no Mod.1 foram de 175 camiões carregados que saem, tendo em conta as unidades de tempo consideradas. No refúgio tiveram uma média de 1.53 camiões à espera, o máximo de camiões em espera no refúgio foram 3 e o mínimo foram 0. A média de tempo de espera no refúgio foi de 24.53 unidades de tempo, sendo que o máximo foi de 55.77 havendo alturas sem tempo de espera.

Na zona de carga o número de trabalhos completos foi de 175, houve uma percentagem de tempo de espera de 45.68%, e de trabalho de 45.39%. Houve um bloqueio de 8.93%, no entanto, não se verificaram paragens.

5.2. Mod.2

Os resultados obtidos no Mod.2 foram a saída de 205 camiões carregados. No refúgio 1, estiveram uma média de 0.9 camiões à espera, sendo que o máximo foram 3 e o mínimo foram 0. O tempo mínimo de espera foi de 0.49 unidades de tempo e o máximo de 60.20 unidades de tempo, em média o tempo de espera foi de 20.42 unidades de tempo.

No refúgio 2 o máximo de camiões em espera foi 3 e mínimo 0, com uma média de 0.43. O tempo de espera foi em média 13.74 unidades de tempo, com um máximo de tempo de 37.10 e um tempo mínimo nulo.

Na zona de carga houve um tempo de espera de trabalho de 34.70%, uma percentagem de trabalho de 53.42% e bloqueio de 11.89%, não havendo paragens.

6. CONCLUSÕES

Com este estudo foram encontrados os resultados esperados, torna-se mais viável a existência de dois refúgios entre a entrada da mina e a zona de carga, isso ficou esclarecido, ao analisar o número de veículos carregados nos dois modelos.

No Mod.1 o refúgio teria que ter dimensões que permitissem a espera de 3 camiões, o mesmo se passa no Mod.2, em que os dois refúgios teriam que ter também essa capacidade. No entanto, no Mod.2 os tempos de espera são inferiores e a percentagem de trabalho foi superior ao Mod.1.

Os resultados obtidos, no entanto, não permitem concluir que o Mod.2 deveria ser executado, uma vez que, outros parâmetros deveriam ser levados em conta. Se na mina não existem refúgios, ou se a capacidade deles for inferior a três veículos, o custo de criar infra-estruturas poderá ser mais elevado que o benefício da quantidade de minério extraído.

Torna-se assim, fácil de entender que a simulação só por si não resolve problemas apenas testa alternativas que depois têm que ser sujeitas a um estudo de viabilidade.

Só recorrendo à análise efectuada nesta tese, poder-se-á concluir que o Mod.2 é o que se adequa melhor à concretização do objectivo pretendido, mas dado não haver conhecimento das condições intrínsecas da mina e de todo o seu sistema operacional essa conclusão poderá ser um risco.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alentejo Popular Online, (2011), "Projecto Prolongará a vida de Neves-Corvo até 2030 – Somincor investe 140 milhões de euros", publicado a 10 de Fevereiro de 2011, acedido no dia 17 de Julho em: http://www.alentejopopular.pt/noticias.asp?id=6088.

Allen, G., Gunn, E. and RUTHEREORD, P., (1993), "Improving Throughput of a Coal Transport System with the Aid of Three Simple Models", Industries-mining/metals, transportation-materials handling, 4 July-August 1993, 88-103.

Anjomshoa, H., Lee, D. H., Pudney, P. J., Albrecht, A. R.and Mackenzie, S. A., (2010), "Passing bays in a underground mine," Minning Tecnologie, vol 119, n.º1, 31-33.

Carvalho, D., (2005), O Presidente da EDM – Empresa de Desenvolvimento Mineiro deu, em Novembro, entrevista à jornalista Paula Cardoso Almeida do "Diário de Noticias", acedido a 22 de Junho de 2011 em: http://www.edm.pt/html/noticia20051109.htm.

Constituição da República Portuguesa (2005) – VII Revisão Constitucional.

Decreto-lei n.º 88/90, de 16 de Março – Depósitos Minerais, "Diário da República, 1ª série n.º 63/90, de 16 de Março de 1990, Ministério da Industria e Energia.

Decreto-lei n.º 90/90, de 16 de Março, "Diário da República, n.º 69/90 SERIE I, de 16 de Março de 1990, Ministério da Indústria e Energia.

Kazakidis, V.N. and Scoble, M., (2003), "Planning for flexibility in underground mine production systems," SME Publications Dept, November.

Lunding Mining, "Neves-Corvo, Portugal", disponível no sítio da internet http://www.lundinmining.com/s/Neves-Corvo.asp, acedido a 22 de Junho de 2011.

Newman, M. Alexandra and Kutchta, Mark, (2004), "Using aggregation to optimize long-term production planning at an underground mine," European Journal of Operational Research 176, 1205–1218.

Pinto, B. E., (2007), "Despacho de caminhões em mineração usando a lógica nebulosa, visando ao atendimento simultâneo de políticas excludentes", Dissertação apresentada à Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais para obtenção do título de mestre em Engenharia de Produção.

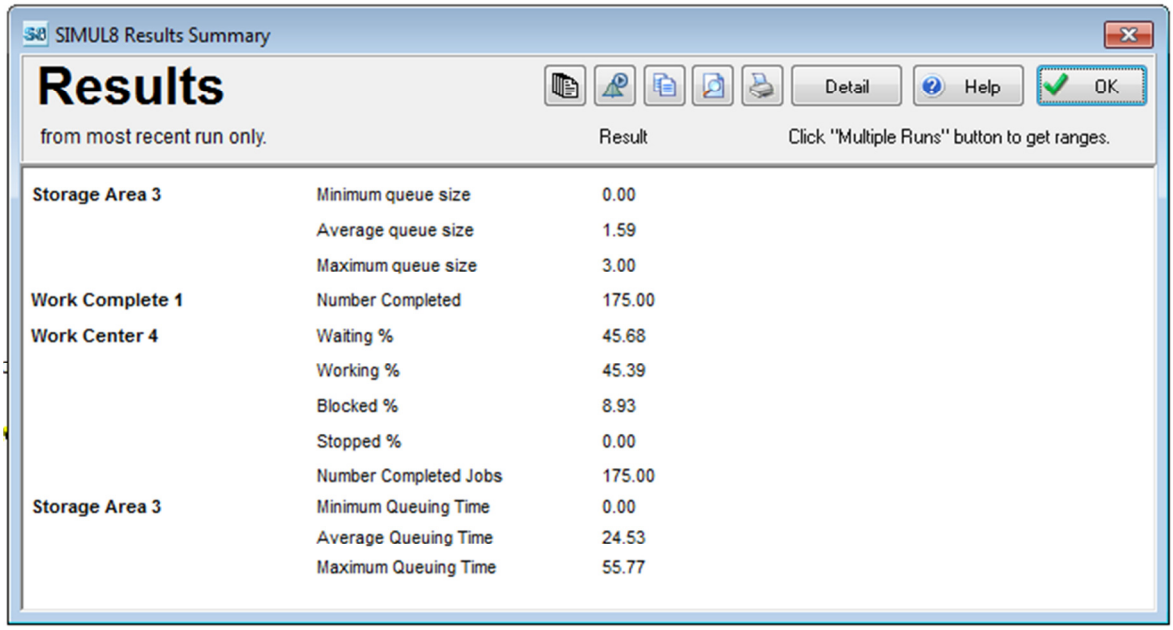
Real, F., (1999), "A Perspective on Neves-Corvo Mining Project Development: Success Against na EU Trend." Mining Development Strategies with Focus on the case of the Iberian Pyrite Belt", Technical Journey 25th September 1998 Lisbon, Portugal acedido a 13 de Julho em: http://e-geo.ineti.pt/edicoes_online/diversos/mining_develop/capitulo4.htm.

Rodrigues, L. F., (2006), "Análise comparativa de metodologias utilizadas no despacho

de caminhões em minas de céu aberto", Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Minas Gerais, belo Horizonte.

Saayman, P., (2005), "Optimization of an autonomous vehicle dispatch System in an underground mine", submitted in partial fulfilment of the requirements for the degree Master of Engineering (Electronic Engineering) in the Faculty of Engineering the Built Environment and Information Technology University of Pretoria.

8. ANEXO A – RESULTADOS RETIRADOS DO SIMULADOR DO MOD.1.


SIMUL8 Results Summary

Results

Detail Help OK

from most recent run only. Result Click "Multiple Runs" button to get ranges.

Storage Area 3	Minimum queue size	0.00
	Average queue size	1.59
	Maximum queue size	3.00
Work Complete 1	Number Completed	175.00
Work Center 4	Waiting %	45.68
	Working %	45.39
	Blocked %	8.93
	Stopped %	0.00
	Number Completed Jobs	175.00
Storage Area 3	Minimum Queuing Time	0.00
	Average Queuing Time	24.53
	Maximum Queuing Time	55.77

9. ANEXO B – RESULTADOS RETIRADOS DO SIMULADOR DO MOD.2.

SIMUL8 Results Summary

Results

Detail Help OK

from most recent run only. Result Click "Multiple Runs" button to get ranges.

Storage Area 3	Minimum queue size	0.00
	Average queue size	0.78
	Maximum queue size	3.00
	Items Entered	194.00
Work Complete 1	Number Completed	205.00
Work Center 4	Waiting %	33.48
	Working %	53.00
	Blocked %	13.52
	Stopped %	0.00
	Number Completed Jobs	205.00
Storage Area 5	Minimum queue size	0.00
	Average queue size	0.55
	Maximum queue size	3.00
	Minimum Queuing Time	0.56
	Average Queuing Time	15.74
	Maximum Queuing Time	45.63
Storage Area 3	Minimum Queuing Time	0.00
	Average Queuing Time	18.82
	Maximum Queuing Time	65.80