



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
UNIDADE ARAXÁ**

VANESSA BRITO PINHEIRO

**CONSTRUÇÃO DE MODELO PARA SIMULAÇÃO DA LOGÍSTICA
DA FROTA DA MINA CUIABÁ**

ARAXÁ/MG

2018

VANESSA BRITO PINHEIRO

**CONSTRUÇÃO DE MODELO PARA SIMULAÇÃO DA LOGÍSTICA
DA FROTA DA MINA CUIABÁ**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Me. Guilherme Alzamora Mendonça

ARAXÁ/MG

2018

FOLHA DE APROVAÇÃO

VANESSA BRITO PINHEIRO

**CONSTRUÇÃO DE MODELO PARA SIMULAÇÃO DA
LOGÍSTICA DA FROTA DA MINA CUIABÁ**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
de Minas do Centro Federal de
Educação Tecnológica de Minas Gerais
- CEFET/MG, como requisito parcial
para obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia de Minas.

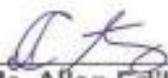
Araxá, 30 de novembro de 2018.



Presidente e Orientador: Prof. Guilherme Alzamora Mendonça
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade
Araxá



Membro Titular: Prof. Me. Michel Melo Oliveira
Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG



Membro Titular: Prof. Me. Allan Erlichman Medeiros Santos
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade
Araxá

DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho aos meus pais
Euripedes e Kátia, e minhas duas irmãs
Marina e Michele, por sempre me
incentivarem e nunca deixarem que eu
desistisse dos meus sonhos.*

AGRADECIMENTOS

A AngloGold Ashanti, por ter me dado a grande oportunidade de trabalhar no Projeto Estéril, que foi a base para a construção deste trabalho.

Ao Lucas Rodrigues de Abreu, meu supervisor no estágio, que durante o curto momento que desenvolvemos este projeto, sempre esteve disposto a transmitir seus conhecimentos, bem como a ajudar a desenvolver este trabalho.

Ao CEFET, por todos os ensinamentos que obtive, não somente de mineração, mas também de cidadania, dignidade, dedicação, entre infinitos outros que pude adquirir nestes quase 10 anos que estudei aqui.

Ao professor Guilherme Alzamora Mendonça, por ter aceitado ser meu orientador e dedicado seu tempo para me ajudar a construir um trabalho cada vez melhor.

Aos meus pais, por todo o amor, dedicação e por sempre estarem ao meu lado, me incentivando e me apoiando em todas as minhas decisões.

Às minhas irmãs, por sempre estarem disponíveis, seja como um ombro amigo ou um aconselhamento acadêmico, entre tantos outros momentos que necessitei ajuda.

Não, não é fácil escrever. É duro como quebrar rochas. Mas voam faíscas como aços espelhados. Ah que medo de começar [...] O que me proponho a contar parece fácil e à mão de todos. Mas a sua elaboração é muito difícil. Pois tenho que tornar nítido o que está quase apagado e que mal vejo.

Clarice Lispector (1995, p. 33)

RESUMO

O presente trabalho apresenta um estudo sobre a construção de um modelo para simulação da logística dos equipamentos de carregamento e transporte da mina Cuiabá, em Sabará – Minas Gerais, através do uso do software Arena. Para construção do modelo foram utilizados os dados da frota de interesse, como velocidade média, capacidade, indicadores de manutenção, KPI's da frota, DMT's, capacidade dos locais de aterro permanente, entre outros. O objetivo deste trabalho é construir um modelo para simulação representativa da logística dos caminhões e carregadeiras da mina, buscando encontrar pontos de gargalo, bem como melhorias no processo. Para isso, foi realizada simulações com a produção programada de fevereiro/2018, que obteve resultados satisfatórios, permitindo que três novos cenários fossem simulados, sendo eles: Variação na velocidade média dos equipamentos de carregamento e transporte, adição do quarto turno e uma simulação da produção programada para 2018. Foi observado então que com o aumento da velocidade média dos caminhões obtêm-se aumento de 2,33% na movimentação total de material na mina, enquanto quando se reduz a velocidade obteve-se uma perda de 3,77% na movimentação total de material. Com a adição do quarto turno obteve-se um aumento de 2,66% na movimentação total. Com a simulação da produção programada de 2018 foi possível concluir que a ferramenta criada é robusta e capaz de simular até cenários mais longos, não sendo limitada a cenários curtos. Conclui-se que o modelo foi representativo, porém ainda foram necessárias novas medidas da empresa para efetuar o controle da movimentação e gestão do estéril na mina, a fim de evitar a ocorrência de perdas na produção.

Palavras-Chave: Simulação. Logística. Frota. Gestão. Estéril.

ABSTRACT

The present work presents a study on the construction of a model to simulate the logistics of the loading and transport equipment of the Cuiabá mine, in Sabará - Minas Gerais, through the use of the Arena software. For the construction of the model, the data of the fleet of interest were used, such as average speed, capacity, maintenance indicators, fleet KPIs, DMT's, capacity of permanent landfill sites, among others. The objective of this work is to construct a model for simulation representative of the logistics of the trucks and loaders of the mine, looking for bottleneck points, as well as improvements in the process. For this, simulations were carried out with the scheduled production of February / 2018, which obtained satisfactory results, allowing three new scenarios to be simulated, being: Variation in average speed of loading and transport equipment, addition of the fourth shift, and the simulation of the scheduled production for 2018. It was observed that with the increase of the average speed of the trucks an increase of 2.33% in the total movement of material in the mine was obtained, while when reducing the speed a loss of 3.77% was obtained in the material handling. With the addition of the fourth shift, there was an increase of 2.66% in total handling. With the simulation of the programmed production of 2018 it was possible to conclude that the tool created is robust and capable of simulating even longer scenarios and is not limited to short scenarios. It was concluded that the model was representative, but new measures were still necessary to control the handling and management of the waste in the mine, in order to avoid the occurrence of production losses.

Keywords: Simulation. Logistics. Fleet. Management. Waste.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Distribuição dos corpos minerais que compõem a mina.....	2
Figura 2: Lavra por corte e aterro. Fonte: SME Mining Engineering Handbook, 2011.....	3
Figura 3 - Lavra por Realces e subníveis Fonte: SME Mining Engineering Handbook, 2011	5
Figura 4: Carregadeira Caterpillar R1700G. Fonte: Caterpillar (2018)	9
Figura 5: Caminhão Caterpillar AD45b. Fonte: Caterpillar (2018)	9
Figura 6: Caminhão Caterpillar AD30. Fonte: Caterpillar (2018)	10
Figura 7: Caminhão Volvo A30F. Fonte: Volvo (2018)	10
Figura 8: Fluxograma de atividades para construção do modelo	15
Figura 9: Fluxograma da lógica utilizada para simulação	16
Figura 10: Transferência de material do silo do nível 9 para a grade do britador do nível 1118	
Figura 11: Planilha para inserção de dados de planejamento	19
Figura 12: Planilha para inserção de dados da frota	19

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1 - Comparativo Real x Simulado – fevereiro/2018	22
Tabela 2 - Variação tempo de ciclo - Carregadeiras	23
Tabela 3 - Variação tempo de ciclo - Caminhão AD-30	23
Tabela 4 - Variação tempo de ciclo - Caminhão AD-45	23
Tabela 5 - Variação tempo de ciclo -Caminhão A30F	23
Tabela 6 - Movimentação total de material (ton)	24
Tabela 7: Comparativo Produção (em ton) - 3 e 4 turnos – fevereiro/2018.....	25
Tabela 8: Simulação Programação 2018	25

LISTA DE ABREVIações E SIGLAS

Ton – Toneladas

m – Metros

km – Quilômetros

KPI - Key Performance Indicator

LHD - Load-Haul-Dump

DMT – Distância Média de Transporte

BIF – Formação Ferrífera Bandada

MTBF – Mean Time Between Failures

MTTR – Mean Time To Repair

SER – Serrotinho

FGS – Fonte Grande Sul

BAL - Balancão

GAL – Galinheiro

CGA – Canta-Galo

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REFERENCIAL TEÓRICO	2
2.1. A empresa	2
2.2. Métodos de Lavra	3
2.2.1. Corte e Aterro	3
2.2.2. Realces e Subníveis	4
2.3. Gestão do Estéril	6
2.3.1. Enchimento com areia seca e rochas	7
2.4. Logística dos Equipamentos	8
2.5. Carregamento e Transporte na Mina	9
2.6. Sistema de Despacho	10
2.7. Key Performance Indicators	11
2.8. Melhorias no Processo	12
2.9. Simulação	13
2.10. Software Arena	13
2.11. Origem do Problema	14
3. METODOLOGIA.....	14
3.1. Coleta de Dados	15
3.2. Mapeamento do fluxo	18
3.3. Inserção dos dados no ARENA	19
3.4. Simulação do Modelo	20
3.5. Validação do Modelo	20
3.6. Simulação de Cenários Alternativos	20
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	21
4.1. Validação do Modelo	22
4.2. Cenários Alternativos.....	22
4.2.1. Variações na velocidade média dos equipamentos	22

4.2.2.	Adição do 4 ^o turno	24
4.2.3.	Planejamento da produção para 2018	25
4.3.	Discussões	26
5.	CONCLUSÃO.....	28
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	30
7.	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS.....	31

1. INTRODUÇÃO

Em uma mina subterrânea, a realização de aberturas de desenvolvimento é fundamental para a produção, pois permite o acesso a novas áreas de minério, que é o grande enfoque de qualquer mineração. Entretanto, com o desenvolvimento das galerias, grandes quantidades de estéril são geradas e, por vezes, não são devidamente destinadas a depósitos adequados. Isto se deve pela ausência de um local em específico para deposição, pelo custo para movimentação de um material que não oferece retorno financeiro para a empresa, ou ainda outros motivos diversos.

A má gestão do estéril, ou seja, a retirada de estéril sem possuir um local apropriado para deposição definitiva, pode gerar um gargalo na mina, causando atrasos na produção. Esses atrasos ocorrem devido à presença do material nas frentes de trabalho, interferindo o desenvolvimento de galerias e a lavra do minério.

Tendo estes problemas em vista, este trabalho tem como enfoque estudar alternativas visando melhorar a gestão do estéril na mina Cuiabá, localizada em Sabará-MG, pertencente à AngloGold Ashanti. Para melhoria na gestão, um dos principais enfoques foi aprimorar a logística dos meios de carregamento e transporte de minério/estéril dentro da mina através de simulações computacionais, utilizando-se o software Arena.

No ramo mineral, as simulações têm o intuito de estudar sistemas para estudo de seu comportamento antes que estes sejam construídos ou implementados. Caso o sistema já esteja operante, a simulação tem como função avaliar rotas alternativas do projeto, bem como pontos a melhorar e possíveis problemas que possam ocorrer, além de permitir fazer análises de custos.

O objetivo principal deste trabalho é criar um modelo dinâmico que simule a realidade do carregamento e transporte da mina, buscando a melhoria na logística dos equipamentos de carregamento e transporte. Além disso, este trabalho também visa detectar gargalos e falhas, realizar melhorias no processo, auxiliar as tomadas de decisão sobre a produção e otimizar a deposição do estéril na mina.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. A empresa

A AngloGold Ashanti é uma empresa multinacional com 18 operações situadas em 9 países. No Brasil, a empresa é sediada nas cidades de Nova Lima, Sabará e Santa Bárbara (Minas Gerais) e em Crixás (Goiás) e é a maior produtora de ouro do país. Além do ouro, a empresa também tem como subproduto o ácido sulfúrico, que é produzido através dos gases gerados no processo de refinamento do ouro.

A mina Cuiabá, onde o trabalho foi desenvolvido, está localizada na cidade de Sabará – Minas Gerais, dentro do Quadrilátero Ferrífero e consiste em uma mina subterrânea com profundidade aproximada de 1500 metros (m) cujas galerias de desenvolvimento primário realizadas apresentam dimensões médias de 5,75 metros por 6,9 metros, enquanto que as galerias de desenvolvimento secundário apresentam dimensões médias de 5,75 metros por 5,75 metros. Sua mineralização consiste principalmente em um nível de formação bandada ferrífera (BIF), encaixada em uma sequência de rochas xistosas. A figura 1 apresenta um recorte da mina no nível 11, mostrando a posição dos principais corpos minerais atualmente explorados na mina Cuiabá.

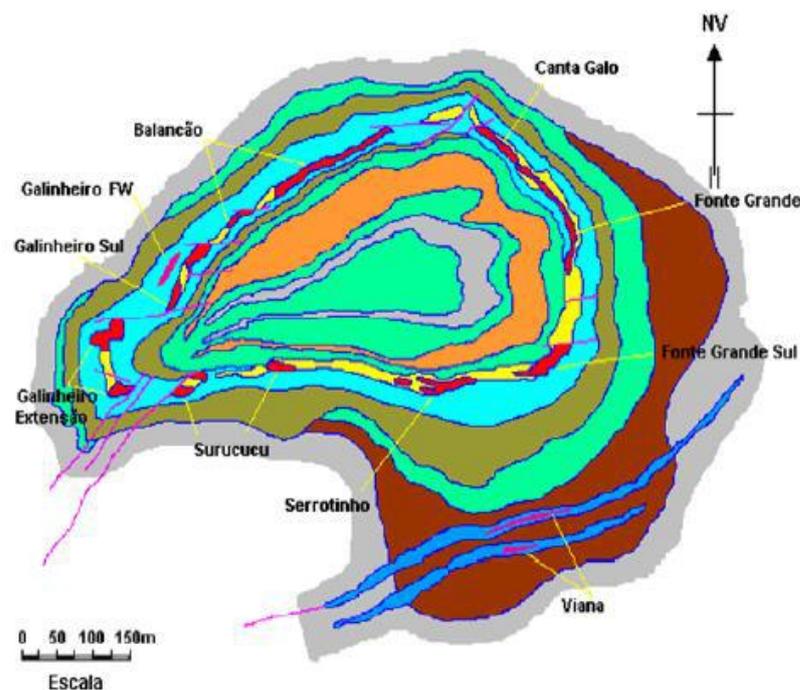


Figura 1: Distribuição dos corpos minerais que compõem a mina

A mina produz anualmente cerca de 838 mil toneladas (ton) de estéril, com uma média mensal aproximada de 69,8 mil ton geradas através do desenvolvimento primário e secundário da mina, que juntos totalizam cerca de 10.300 metros de galerias abertas em um ano.

2.2. Métodos de Lavra

Para a mina em estudo, dois métodos de lavra foram aplicados, sendo o primeiro, Corte e Aterro, utilizado nos níveis iniciais da mina, representando cerca de 30% da lavra na mina, e hoje não sendo mais praticado. O segundo método consiste na Lavra por Realces e Subníveis, representando 70% da lavra da mina, sendo o principal método aplicado pela empresa atualmente.

2.2.1. Corte e Aterro

Este método possui diferentes variações, porém consiste basicamente na remoção de camadas horizontais de minério, que são em seguida substituídas por uma camada de enchimento. Os tipos de enchimentos mais utilizados, segundo Hartman (2002) são: preenchimento com estéril, pneumático, preenchimento hidráulico com pasta diluída ou de alta densidade, sendo mais comum a utilização do próprio estéril removido da mina, por motivos econômicos. Este método é mais aplicado a minas de porte médio. A figura 2 representa um exemplo de aplicação do método de lavra por corte e aterro.

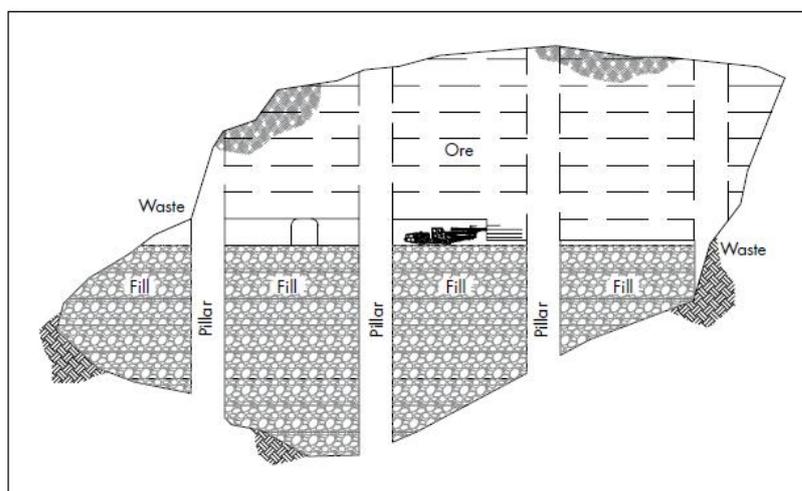


Figura 2: Lavra por corte e aterro. Fonte: SME Mining Engineering Handbook, 2011

Com relação às condições apropriadas para implantação deste método, Hartman, Howard L. (2002) citam que o minério deve apresentar resistência de moderada à alta, para que permita a que o realce permaneça aberto através do cabeamento no teto ou do cabeamento combinado de tela. O depósito deve preferencialmente apresentar formato tabular, porém não precisa ser necessariamente contínuo, sendo necessário apenas a separação clara de minério/estéril no realce.

Esse método se mostra muito versátil e adaptável à diversos cenários por possuir várias variações, permitindo sua aplicação em diversos casos. Outro ponto positivo é a boa seletividade e baixa diluição que esse método apresenta, além da produtividade moderada.

Dentre os pontos negativos do método, Hartman (2002) cita o custo envolvido no manuseio do material a ser aterrado, que pode atingir até 50% dos custos do processo de mineração, tornando estes custos elevados. Outro ponto é descontinuidade presente no método devido à necessidade da realização do aterramento do material para que seja possível dar continuidade à lavra do minério.

2.2.2. Realces e Subníveis

De acordo com Hartman (2002), este método de lavra auto suportado consiste na abertura de um grande realce no corpo mineral para retirada do minério, que geralmente é dividido em subníveis. Inicialmente é aberto uma galeria no corpo mineral e então são feitos os processos de perfuração e detonação da rocha. Os realces podem ter altura variada, sendo que em certas minas podem chegar à 30-40 metros de altura. A figura 3 representa como o método de lavra por realces e subníveis ocorre:

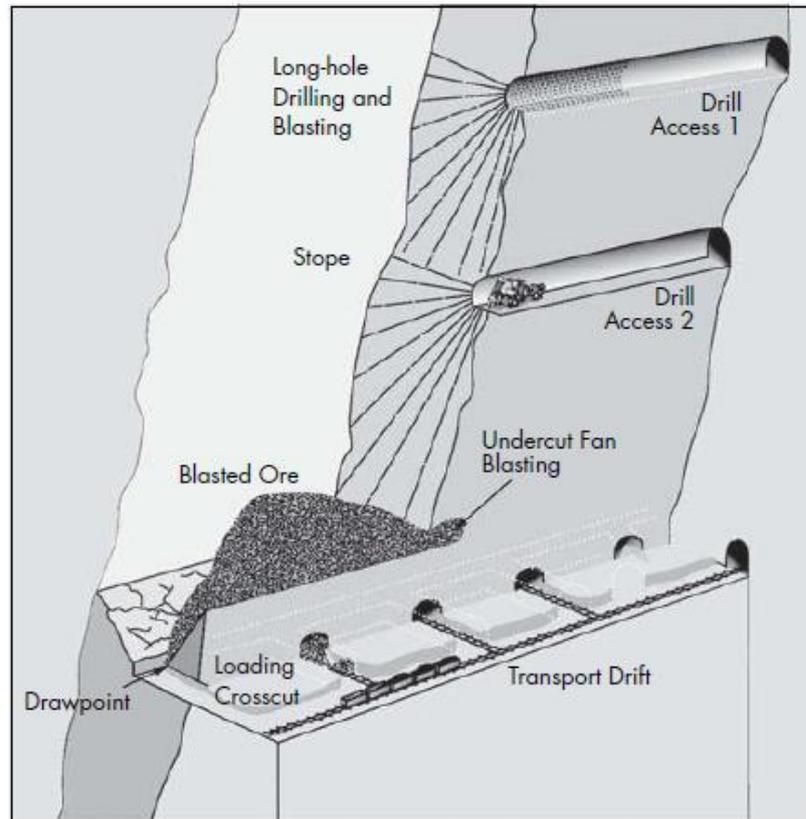


Figura 3 - Lavra por Realces e subníveis Fonte: SME Mining Engineering Handbook, 2011

Este método requer que o minério apresente resistência de moderada à alta, para que permita que o realce permaneça aberto durante toda a operação de lavra. O depósito deve ser preferencialmente com formato tabular ou lenticular com mergulho acima de 45° . Outro aspecto importante é o minério deve ser relativamente uniforme, já que não se trata de um método de lavra seletivo.

Além disso, o método pode ser aplicado em depósitos com profundidades diversas, desde relativamente rasos a profundos, havendo casos em minas com profundidade de 2,4 quilômetros (km) (Hartman, 2002).

Segundo Hartman (2002), as principais vantagens deste método são a alta produtividade, pois este permite a mecanização de praticamente todas as etapas do processo (perfuração, detonação, carregamento e transporte), além de apresentar baixos custos de produção e as operações unitárias podem ocorrer simultaneamente, sem afetar a produção. Outra vantagem é a boa recuperação (por volta de 75%) e baixa diluição (em torno de 20%).

Como comparativo entre os métodos de lavra aplicados na mina é possível citar que apesar do método de lavra por Corte e Aterro ser um método muito comum e que apresenta baixo custo de investimento inicial e ser muito versátil, o método de lavra por Realces e Subníveis apresenta maior produtividade. Outro ponto importante da lavra por Realces e Subníveis é o fato de poder ser aplicado em rochas com resistência elevada e teores moderados, enquanto que o método por Corte e Aterro requer teores elevados de minério, pois apresenta custo operacional maior.

2.3. Gestão do Estéril

Em qualquer mineração ocorre geração de estéril. No caso de minas subterrâneas, o volume gerado é relativamente baixo, se comparado à mineração a céu aberto. Ainda assim uma quantidade considerável desse material é gerada. A gestão do estéril é então um ponto crucial para desenvolvimento da mina, pois pode causar atrasos na produção e em casos mais extremos, fazer com que essa seja interrompida, conforme Hassani and Archibald (1998).

Uma má gestão do estéril na mina pode impedir a abertura de novas galerias e realces, já que o material detonado na frente de trabalho não está sendo adequadamente direcionado para depósitos temporários ou definitivos.

Na mina em estudo, o estéril é, na maioria das vezes, depositado em realces, já que o material se apresenta próximo aos locais passíveis de serem preenchidos. Isso se converte em ganho econômico para a empresa, pois reduz a quantidade de material a ser transportado por grandes distâncias, diminuindo a necessidade de se construir pilhas de estéril na superfície, que requerem grande supressão vegetal e geram impacto visual negativo para a região. Além disso, as pilhas de estéril geralmente se localizam à grandes distâncias das frentes de lavra, aumentando os custos com transporte de um material que não tem retorno financeiro para a empresa (SME Mining Engineering Handbook, 2011).

É importante salientar também que o preenchimento conseqüentemente diminui o deslocamento de material do teto, minimizando também a subsidência da superfície, já que os espaços vazios na mina serão preenchidos, com o maciço não tendo espaço para subsidir.

Conforme citado anteriormente, a construção de uma pilha de estéril causa diversos tipos de impactos ambientais, desde o processo de preparação do local para instalação da pilha até a deposição do estéril em si. Durante as diversas etapas para a instalação do projeto da pilha de estéril, pode-se citar alguns impactos associados à atividade, como: supressão da fauna e flora local, alteração nos usos do solo, alteração da dinâmica hídrica no local, geração de poeira e ruídos, grandes movimentações de massa, alteração da paisagem, contaminação do solo, água superficial e subterrânea, além da poluição visual.

Existem diversas formas de deposição de estéril para enchimento de escavações em minas subterrâneas. De acordo com o SME Mining Engineering Handbook, é possível citar sete maneiras mais comuns para deposição, sendo elas:

- Enchimento com areia seca e rochas;
- Aterro hidráulico não cimentado;
- Enchimento hidráulico cimentado;
- Preenchimento com rocha cimentada;
- Preenchimento com pasta;
- Preenchimento pneumático;
- Preenchimento com fluídos;

Dos métodos supra-citados, neste trabalho será dado enfoque ao enchimento com areia seca e rochas, por ser o método aplicado na mina em estudo.

2.3.1. Enchimento com areia seca e rochas

Consiste no método mais simples para preenchimento de realces. A principal vantagem dessa metodologia diz respeito ao fato de não depender de rejeitos gerados em uma planta de beneficiamento, com o material do enchimento podendo ser a própria rocha removida durante o desenvolvimento da mina, bem como areia, entre outros. Com isso, os custos de transporte são reduzidos, já que o material já se encontra *in loco*, portanto o material não precisa ser transportado por longas

distâncias. Além disso, não é necessário preparar o material adicionando insumos, como cimento e outros componentes, afim de melhorar suas propriedades.

Sua desvantagem principal é o fato de, dependendo do formato do realce, seu preenchimento até o topo ser dificultado, ou muitas vezes impossibilitado. Outro ponto negativo é o fato de o material seco depositado apresentar densidade baixa, já que este já se apresenta empolado e, portanto, possui grande quantidade de espaços vazios. No momento em que é depositado, este material pode ser submetido a elevada compressão, ocorrendo um assentamento nas rochas nos vazios já existentes. Caso esses vazios sejam preenchidos de forma satisfatória, essas rochas serão capazes de absorver de forma considerável as tensões do maciço, dando o suporte adequado para as paredes e teto da escavação. Porém, caso esse ajuste não seja apropriado, poderão surgir pontos sem o escoramento desejado, instabilizando a região.

Na mina objeto de estudo nesse trabalho, nos casos extremos nos quais a empresa não possui local dentro da mina subterrânea para deposição do estéril, este é içado via poço e transportado até a antiga mina a céu aberto desativada, onde é devidamente depositado.

2.4. Logística dos Equipamentos

Para que a movimentação de material dentro da mina ocorra de forma adequada, a logística dos equipamentos deve ser bem planejada para que se obtenha uma operação ótima, sem filas em carregadeiras, além de evitar que material se acumule na mina devido à falta de equipamento.

Conforme Alarie e Gamache (2010), o tamanho e as distâncias transportadas impactam a eficiência de uma frota. Caso os equipamentos de transporte sejam poucos, as carregadeiras ficarão ociosas e se os equipamentos de transporte forem muitos, as filas nas carregadeiras irão aumentar. Tendo isso em vista, achar o ponto ótimo onde os equipamentos de carregamento não fiquem ociosos e grandes filas não ocorram é primordial para otimização da produção e utilização dos equipamentos.

Além disso, é fundamental que os equipamentos de transporte e carregamento tenham capacidades proporcionais entre si, evitando subutilização ou sobreutilização

dos mesmos. No tópico a seguir será exposto a frota de carregamento e transporte presente na mina atualmente.

2.5. Carregamento e Transporte na Mina

Para a remoção, deslocamento e deposição do estéril desmontado na mina alguns equipamentos são utilizados. Isso implica na necessidade de um planejamento adequado de tais atividades de forma a otimizar a utilização desses recursos. Na mina, 4 tipos de equipamentos são utilizados nas etapas de carregamento e transporte, sendo eles:

1. Carregadeiras Load-Haul-Dump (LHD) Caterpillar R1700G, sendo 9 unidades desta, com capacidade nominal de carregamento de 12,5 ton. As carregadeiras podem ser operadas tanto com o operador dentro do equipamento, quanto remotamente, caso o ambiente de trabalho possa vir a oferecer riscos. Na mina operam tanto em estéril quanto minério. A carregadeira R1700G pode ser vista na figura 4:



Figura 4: Carregadeira Caterpillar R1700G. Fonte: Caterpillar (2018)

2. Caminhões Caterpillar AD45b, presente na figura 5, com capacidade nominal de 45 ton, em um total de 8 unidades;



Figura 5: Caminhão Caterpillar AD45b. Fonte: Caterpillar (2018)

3. Caminhões AD30, com capacidade nominal de 30 ton, sendo 5 unidades deste. Um exemplo deste caminhão pode ser visto na figura 6 que segue:



Figura 6: Caminhão Caterpillar AD30. Fonte: Caterpillar (2018)

4. 2 caminhões Volvo A30F, como o da figura 7, com capacidade nominal de 30 ton.



Figura 7: Caminhão Volvo A30F. Fonte: Volvo (2018)

Os três tipos de caminhões podem operar carregando tanto estéril quanto minério, conforme indicação do sistema de despacho.

2.6. Sistema de Despacho

Minas de grande porte, tanto à céu aberto quanto subterrânea, como a estudada neste trabalho, comumente apresentam diversas frentes de lavra operando simultaneamente, visando fornecer para a usina de tratamento de minérios, um minério conforme as especificações de qualidade necessárias. Para isso, é essencial planejar, programar e controlar os recursos e a produção, de forma que seja possível atender às necessidades da usina. Nessa linha, diversos equipamentos são utilizados,

como carregadeiras, caminhões, escavadeiras, entre outros que apresentam confiabilidade de uso variável. (COSTA; GANGA, 2010).

Tendo em vista a maximização da eficiência de utilização dos equipamentos de transporte, várias empresas fazem uso de sistemas capazes de definir as melhores rotas considerando-se restrições de custos, tamanho de frota entre outras variáveis. (CUNHA, 2000). Essa roteirização de caminhões é de grande importância e complexidade, pois uma alocação ótima pode resultar em grande economia para a empresa. Essa roteirização pode ser realizada através de um sistema de despacho estático ou dinâmico.

Em um sistema de despacho estático, conforme SOUZA, *et al.* (2011), o caminhão apenas se desloca em uma rota única, entre um ponto de basculamento e um ponto de carga. Ainda de acordo com o autor, esse método é utilizado devido à simplificação das operações e ao custo de implantação de um sistema de despacho computadorizado. No caso do alocamento estático dos caminhões, este apresenta a desvantagem de ser sensível à formação de filas durante o carregamento e não aproveitar a ociosidade dos caminhões.

Ainda conforme SOUZA, *et al.* (2011), caminhões operando em um sistema de alocação dinâmica não ficam fixos a uma determinada rota, como ocorre em um sistema estático. Eles podem operar direcionados a diversas frentes de lavra, onde um equipamento de carga compatível esteja. Dessa forma, a produtividade da frota aumenta e, segundo Costa (2005), possibilita um aumento na capacidade produtiva da mina, ou até mesmo a redução de equipamentos necessários para que seja mantida o mesmo nível de produção.

O sistema de despacho empregado na mina é o SmartMine UG que, de acordo com a Hexagon, fornecedora do sistema, consiste em uma ferramenta de controle da frota através do monitoramento do progresso das tarefas sendo executadas. Esse sistema também fornece dados de gestão da produção, controle de processos, e principalmente os Key Performance Indicators (KPI's) da frota, que serão de grande importância nesse trabalho, pois será a base para a simulação da logística da frota.

2.7. Key Performance Indicators

Como citado no tópico anterior, este trabalho se baseia nos KPI's da frota para a construção da simulação da logística da frota da mina. Conforme Parmenter, David (2007), KPI's podem ser definidos como “o conjunto de medidas focadas nos aspectos de desempenho organizacional que são mais críticos para o momento atual e futuro da organização”. O autor também cita que entre as características principais de um KPI, é possível citar o fato de não estar atrelado à uma medida financeira (como dólar, real, etc), deve ser medido frequentemente, apresentar impacto significativo e positivo.

Esses indicadores devem ser monitorados constantemente, seja 24 horas por dia, diariamente, ou no máximo, semanalmente, para que mantenham o caráter de indicador chave para a empresa e permita maior controle das operações de lavra.

Através dos KPI's da frota, será possível detectar pontos de gargalos que podem ser melhorados.

Dentre os KPI's fornecidos pelo SmartMine UG, pode-se citar:

- Tempo de Carregamento;
- Tempo de deslocamento cheio,
- Tempo de deslocamento vazio;
- Fila para carregamento;
- Fila para descarga;
- Tempo de descarga;
- Tempo de abastecimento;

2.8. Melhorias no Processo

Em todo processo busca-se constantemente por melhorias e avanços, e o uso de simulações tem se tornado cada vez comum devido à suas diversas aplicações em diversas áreas de conhecimento.

As simulações têm como ponto principal permitir que diversos cenários sejam simulados antes que qualquer mudança operacional ou investimento seja feito. Isso permite uma redução nos custos da empresa, além de ser possível encontrar pontos onde melhorias podem ser feitas, gargalos na produção podem ser desfeitos, otimizando a produção.

Neste presente trabalho, se busca a melhoria na logística dos caminhões, otimizando a produção da frota na mina, de modo que mais estéril possa ser transportado e aterrado sem que afete a produção do minério, diminuindo a bolha de estéril excedente gerada pelo desenvolvimento durante os anos.

2.9. Simulação

Segundo Turner (1999), a utilização de simulações de processos e sistemas é uma grande ferramenta para estudar os efeitos de novos investimentos no empreendimento, bem como planejamento de produção, mudanças operacionais, de equipamentos e rotas de produção, avaliação da capacidade de produção, entre vários aspectos. Além disso, a simulação permite se estudar diversos cenários antes que estes sejam implementados, reduzindo gastos desnecessários, otimizando operações detectando aspectos críticos, entre diversas outras vantagens. Sem a simulação dos cenários, as decisões e ações são baseadas em impressões, que podem funcionar para modelos simples, mas em modelos mais passa a apresentar limitações em modelos mais complexos.

Com esses pontos em vista é que será utilizado a simulação da logística de caminhões neste trabalho, buscando o ponto ótimo em que os caminhões consigam trabalhar, afim de atingir melhor escoamento do estéril na mina.

Para realização das simulações da logística, o software Arena será a principal ferramenta nesse processo.

2.10. Software Arena

O Arena é uma ferramenta para modelamento matemático que permite fazer análise de diversos cenários, além de permitir simulações de processos. Tal software se baseia na construção de fluxogramas para a modelagem, o que simplifica a construção do projeto em sua interface.

Além disso, o Arena se baseia em um modelo de simulação Estocástico, ou seja, permite a inserção de um ou mais variáveis aleatórias, tendo como resposta

diversas saídas aleatórias, que devem ser analisadas como estimativas estatísticas das singularidades do sistema (Paragon).

2.11. Origem do Problema

A gestão do estéril na mina se tornou um ponto crucial para o processo devido à diversos fatores, sendo alguns deles:

- Falta de um plano robusto para gerir a movimentação e gestão de estéril no subsolo;
- Competição de recursos do transporte horizontal (caminhões e carregadeiras) para realizar a movimentação do estéril, contra a movimentação do minério;
- Competição no uso do poço (shaft) pra extração do material do subsolo para a superfície, onde a prioridade muitas das vezes era para remoção do minério;
- Aumento do custo operacional para a retirada do estéril do subsolo para a superfície contra mantê-lo no subsolo.

Dessa forma, é de extrema relevância entender a gestão do estéril dentro das operações da mina, assim como estudar as alternativas que tornem a atividade mais viável.

3. METODOLOGIA

Como uma tentativa de resolver o problema citado no capítulo anterior, uma simulação no software Arena foi construída, visando melhorar a logística dos caminhões presentes na mina Cuiabá Para desenvolvimento deste trabalho foram definidas 7 etapas fundamentais para construção e aperfeiçoamento do modelo de simulação da logística dos caminhões. As etapas foram organizadas na forma de um fluxograma de atividades, visto na figura 8 abaixo:

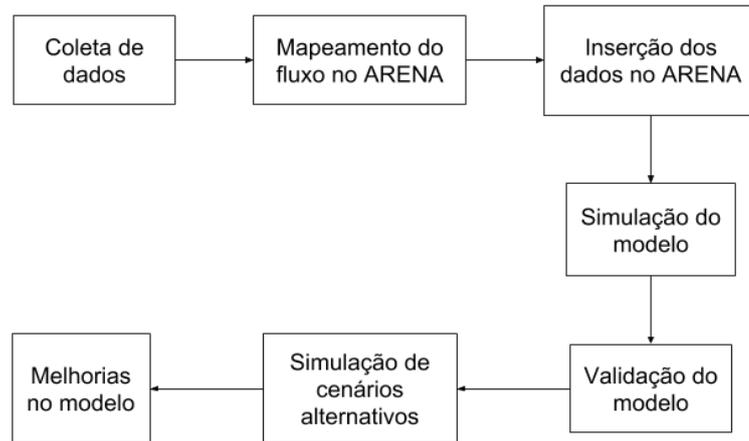


Figura 8: Fluxograma de atividades para construção do modelo

3.1. Coleta de Dados

A Coleta de Dados é a primeira etapa do processo, constituindo a base do modelo que será construído.

Para a construção do modelo, dados da frota, como velocidade média, capacidade, indicadores de manutenção (Mean Time Between Failures (MTBF) e Mean Time To Repair (MTTR)), KPI's, tempos médios de ciclo foram coletados, bem como a taxa de produção do poço, capacidade dos pontos de aterro, estoque temporários e dos silos de estéril/minério, frentes em lavra e em desenvolvimento, massa de material movimentado de cada frente em lavra, distâncias médias de transporte (DMT's) dos equipamentos de cada ponto da mina, horas efetivas do turno foram coletados, de acompanhamento da rotina dos caminhões, seja através dos registros gerados pelo sistema de despacho, e também por planilhas de controle interno da empresa.

É na etapa de coleta de dados que também foi definido o modelo de logística atual da mina, como visto no fluxograma na figura 6:

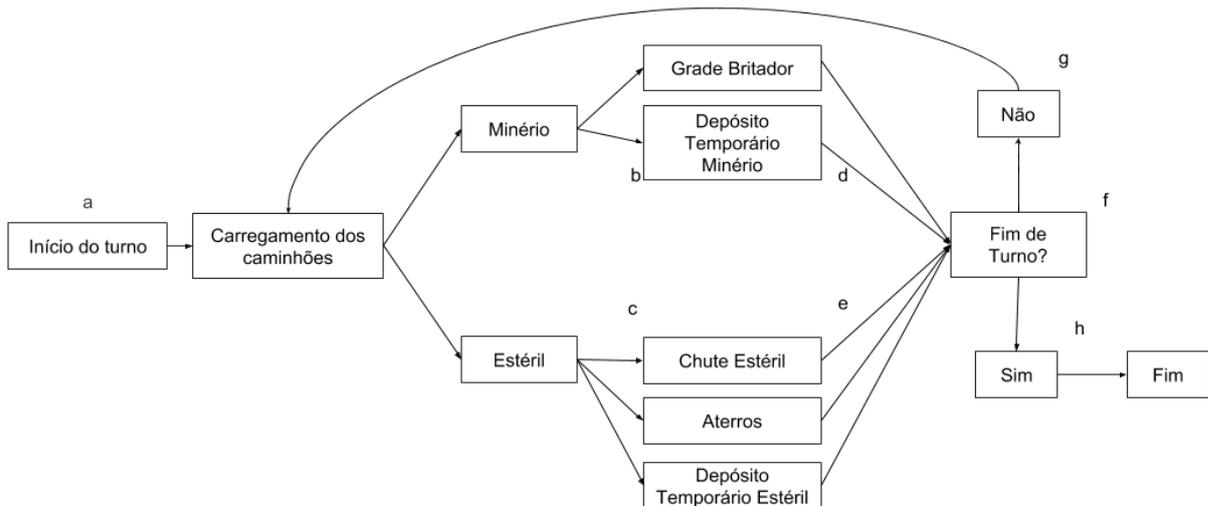


Figura 9: Fluxograma da lógica utilizada para simulação

Conforme pode ser visto na figura 9, ao início de uma jornada de trabalho, ou seja, ao início de um turno (a), os caminhões dentro da mina são direcionados para os pontos de carregamento, sejam eles realces em lavra, locais em desenvolvimento de travessas ou rampas, para que sejam carregados com material para ser transportado, sendo ele estéril ou minério. Caso o caminhão seja carregado com minério (fluxo b), o material pode ser destinado para 2 locais diferentes, sendo eles a grade do britador no nível 11 ou o depósito temporário de minério (tombos de minério) de minério, localizado no nível 12 Serrotinho (SER).

Na grade do britador no nível 11 o material passa pelo processo de britagem e é então direcionado para a estação de carga, onde será carregado em um skip sendo então içado para a superfície, onde o minério irá seguir a etapas seguintes de beneficiamento. No caso do minério alocado no depósito localizado no nível 12SER, este fica temporariamente estocado, até ser redirecionado para a grade do nível 11 e ser içado e seguir para as etapas seguintes de beneficiamento.

Caso o caminhão seja carregado com estéril (fluxo c), este possui três rotas a seguir, podendo ser direcionado para o chute de estéril, localizado no nível 11, para os pontos de aterro localizados em diversos locais espalhados pela mina ou para os pontos de depósito temporário de estéril (tombos de estéril), que são o Waste Pass presente no nível 10.1 e o ponto de tombo no N17 Ligação. Se o caminhão for direcionado para o chute de estéril, este ficará armazenado no silo até ser direcionado para a estação de carga, onde será içado pelo poço até superfície e direcionado para a mina à céu aberto desativada para ser então aterrado.

Caso os caminhões sejam direcionados para os pontos de aterro, este irá descarregar o estéril no local, que será aterrado, ficando lá definitivamente. Na terceira opção, ou seja, nos pontos de depósito temporário, o estéril é armazenado provisoriamente, até ser direcionado para uma das duas opções supracitadas.

Após o material (seja minério ou estéril) ser descarregado, o caminhão passa para o fluxo d (no caso do minério) ou e (estéril), e se depara com a questão 'Fim de turno' (f). Se o tempo restante no turno for suficiente para fazer iniciar um novo ciclo, o caminhão é redirecionado para o fluxo g, retornando ao carregamento dos caminhões, reiniciando o ciclo. Se o tempo restante não for suficiente para uma nova viagem, o caminhão segue para o fluxo h e encerra o turno.

Finalizando-se um turno ocorre então a troca de pessoal, iniciando-se um novo turno, ou seja, reiniciando o ciclo.

Dos dados da mina, para a construção do modelo foram utilizados:

- Frentes presentes nos seguintes corpos minerais:

- Serrotinho (SER);
- Fonte Grande Sul (FGS);
- Balancão (BAL);
- Galinheiro (GAL);
- Canta-Galo (CGA).

- Frota:

- 9 Carregadeiras R1700;
- 5 Caminhões AD30 – Capacidade 25ton;
- 8 Caminhões AD45 – Capacidade 40 ton;
- 2 Caminhões A30F – Capacidade 25 ton.

- Poço – produção: 272 t/h;

- Silos:

- 3º Sistema (Estéril);
- 4º Sistema (Minério).

- Estoques (tombos):

Estéril:

- N17 LIGAÇÃO – Capacidade 5.000 ton;
- N10.1 Waste Pass – Capacidade 3.000 ton.

Minério:

- N12 SER ESTOQUE – Capacidade 2.500 ton.

3.2. Mapeamento do fluxo

Após a coleta dos dados, é realizado um mapeamento do fluxo (sequência) dentro do software Arena, de modo que a simulação seja capaz de seguir uma sequência lógica que seja o mais próximo possível à realidade da mina.

A figura 10 apresenta um exemplo de fluxo mapeado no Arena, referente ao processo de transferência do material do silo presente no nível 09 para a grade do britador no nível 11:



Figura 10: Transferência de material do silo do nível 9 para a grade do britador do nível 11

3.3. Inserção dos dados no ARENA

Com o fluxo já mapeado no software, é necessário inserir os dados da mina que foram coletados na primeira etapa no software para que a simulação seja feita. Para isso, foi criada uma pasta com várias planilhas no Excel, que podem ser vistas nas figuras 11 e 12, onde os dados foram organizados e em sequência são exportados para Arena através do uso de uma macro na planilha.

PARAGON DECISION SCIENCE										ANGLOGOLD ASHANTI		
Exportar										Planejamento		
ID	Local	Quantidade (t)	Material	Dia Início	Dia Término	Frota 01 - AD30	Frota 02 - AD45	Frota 03 - A30F	Dependência	Total	Dia	
1	N14-FGS	308	Estétil	1	1	Sim	Sim	Sim		Minério	98.133	3.505
2	N13-BAL	307	Estétil	1	1	Não	Não	Não		Estétil	67.442	2.409
3	N12.1-BAL	307	Estétil	1	1	Não	Não	Não				
4	N19-FGS	371	Estétil	1	1	Sim	Sim	Sim				
5	N13-FGS	307	Estétil	1	1	Sim	Sim	Sim				
6	N17.1-D5-FGS	307	Estétil	1	1	Sim	Sim	Sim				
7	N19-SER-BAL	371	Estétil	1	1	Sim	Sim	Sim				
8	N14-FGS	308	Estétil	1	1	Sim	Sim	Sim				
9	N14-BAL	318	Minério	1	1	Não	Não	Não				
10	N12-BAL	316	Minério	1	1	Não	Não	Não				
11	N13.1-BAL	316	Minério	1	1	Não	Não	Não				
12	N13.1-BAL	307	Estétil	2	2	Não	Não	Não				
13	N17.1-D5-FGS	307	Estétil	2	2	Sim	Sim	Sim				
14	N19-FGS	307	Estétil	2	2	Sim	Sim	Sim				
15	N13.1-BAL	307	Estétil	2	2	Não	Não	Não				

Figura 11: Planilha para inserção de dados de planejamento

PARAGON DECISION SCIENCE		ANGLOGOLD ASHANTI	
Exportar			
Turnos			
horas efetivas/turno	4,3	Dias de Simulação	28
horas efetivas/dia	12,9	Dia da Semana Inicial	Quinta-Feira
		Mês Inicial	Fevereiro
Carregadeiras			
Qtde	9	Qtde Mínima de Carregadeiras	
Vel média (km/h)	10	Minério	2
		Estétil	1
		Qtde de Carregadeiras Aterros/Pontos Tombo	
		Estétil	1
		Tempo Máximo de Parada para manter fila	
		Tempo (min)	30
Frota 01 - AD30			
Paradas Operacionais			
MTBF (h)	70 * BETA(0,737, 8,17)		
MTTR (h)	GAMM(1,05, 0,521)		
Manutenção Corretiva			
MTBF (h)	58,0,5,11,49,0,7,23,95,0,9,51,11,1,129,74		
MTTR (h)	1,05,0,5,2,32,0,7,4,38,0,9,9,57,1,73,56		
Manutenção Preventiva			
MTBF (h)	77,0,5,116,77,0,7,206,98,0,9,406,13,1,977,62		
MTTR (h)	0,24,0,5,1,04,0,7,15,93,0,9,66,65,1,157,51		

Figura 12: Planilha para inserção de dados da frota

Nessa etapa, dados de planejamento da produção frente a frente diária e mensal são compilados, as DMT's de cada frente para cada ponto de estoque e para os silos/grade são ordenadas. Além disso, a quantidade e a velocidade média de cada grupo de equipamento são definidas, a preferência de operação de cada grupo de equipamento (operar em estétil/minério), o número de dias a ser simulado no Arena, tempo máximo de fila nas carregadeiras, o dia da semana em que se inicia o mês da

simulação, se a frota é própria ou de alguma empresa terceirizada, quais realces serão aterrados no mês, o volume de cada um, entre outras variáveis.

3.4. Simulação do Modelo

Com os dados organizados e o modelo já mapeado no Arena, a simulação é então efetuada. Para este trabalho, foi definido que cada simulação fosse replicada 30 vezes, para o máximo de possibilidades que cada evento possa acontecer sejam registrados.

Uma vez que a simulação é realizada, os resultados são compilados e os relatórios são organizados na forma de gráficos, diagramas de caixa e tabelas através do software Power BI.

3.5. Validação do Modelo

Uma vez que o modelo é simulado, é necessário validá-lo, ou seja, confirmar se os resultados obtidos na simulação são o mais próximos o possível do real. Isso é feito comparando-se a produção real da mina, os tempos de ciclos obtidos com os reais, como ocorreu a movimentação dos aterros e estoques.

3.6. Simulação de Cenários Alternativos

Com o modelo já refinado, cenários alternativos podem ser simulados, afim de estudar o comportamento da mina em diversos contextos diferentes do real, os efeitos das mudanças e as melhorias e perdas que podem ocorrer no processo.

Neste trabalho, além do planejamento de produção mensal da empresa, foram previstos a simulação de mais três cenários alternativos, sendo eles:

- a. Variações na velocidade média dos equipamentos.

A variação na velocidade média nos equipamentos pode interferir na produção final de uma mina. Um caminhão se movendo mais rápido pela mina conseqüentemente terá tempo de ciclo menor, ou seja, em um turno, conseguirá fazer mais viagens e mais material será transportado. De forma análoga, um caminhão que se locomove

mais lentamente terá tempo de ciclo maior, reduzindo a quantidade de material transportada em um turno.

A velocidade média dos equipamentos pode ser afetada pela própria capacidade do equipamento, pela qualidade e inclinação das rampas e também pelo layout da mina. Um piso irregular nas rampas dificulta a circulação dos caminhões passa a transitar, muitas das vezes, em velocidade menor por motivos de segurança. Uma mina com rampas com ângulo mais elevado irá exigir mais da mecânica do caminhão, que não será capaz de desenvolver velocidades mais elevadas.

b. Adição do 4º turno;

A adição de um quarto turno visa aumentar as horas de operação na mina, visando diminuir a perda de tempo ocasionada pelas trocas de turno ao sobrepô-las, passando de 3 trocas para somente 2 trocas por dia. A simulação deste cenário visa conhecer o impacto gerado pela criação deste 4º turno na produção da mina.

c. Planejamento da produção para 2018.

A simulação da produção planejada para 2018 tem como intuito analisar a robustez da ferramenta criada no software, bem como a precisão da simulação para períodos longos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após o mapeamento do fluxo no software Arena realizado, foram obtidos os resultados para as simulações definidas para este trabalho, conforme podem ser vistos nos tópicos que seguem.

4.1. Validação do Modelo

Conforme citado na Metodologia, foi utilizado como base para a simulação e validação do modelo a produção programada da mina referente ao mês de fevereiro/2018. A tabela 1 apresenta os dados comparativos entre os valores de produção (em ton) obtidos na simulação e os dados reais:

Tabela 1 - Comparativo Real x Simulado – fevereiro/2018

Cenário	Programado		Material Movimentado		Total Movimentado	Poço		Total Içado
	Minério	Estéril	Minério	Estéril		Minério	Estéril	
Real	98.133	67.442	86.889	75.753	162.642	82.888	16.394	99.282
Simulado	98.133	67.442	89.420	61.610	151.030	82.720	14.080	96.800

Nota-se que a simulação apresentou uma produção de minério 2,91% maior enquanto a produção de estéril foi 18,67% menor, gerando uma diferença no total de material (estéril+minério) movimentado igual a 7,14%. Mesmo existindo tal diferença nos valores, o modelo construído foi considerado válido, e novos cenários alternativos foram simulados, buscando conhecer pontos de melhoria, possíveis gargalos na produção, bem como aprofundar mais na ferramenta criada. O tópico 4.2 apresentará os diversos cenários alternativos criados.

4.2. Cenários Alternativos

Além do cenário simulado para a validação do modelo, outros 4 cenários também foram simulados e seus resultados podem ser vistos nos tópicos que seguem.

4.2.1. Variações na velocidade média dos equipamentos

Foram simulados dois cenários distintos onde se variava a velocidade média dos equipamentos de carregamento e transporte da mina na simulação. As tabelas 2, 3, 4, 5 e 6 a seguir apresentam, através da simulação, o impacto da variação na velocidade média na produção da mina, onde o cenário (1) considera a produção (em

ton) com a velocidade usual dos equipamentos, o cenário (2) considera o aumento de 1 km/h nas velocidades médias e o cenário (3) a velocidade média dos equipamentos foi reduzida em 1 km/h.

Tabela 2 - Variação tempo de ciclo - Carregadeiras

Cenário	Velocidade Média (km/h)	Tempo de Ciclo (min) Estéril	Tempo de Ciclo (min) Minério
1	10	9,1	9,1
2	9	9,1	9,1
3	11	9,1	9,1

Tabela 3 - Variação tempo de ciclo - Caminhão AD-30

Cenário	Velocidade Média (km/h)	Tempo de Ciclo (min) Estéril	Tempo de Ciclo (min) Minério
1	10	41,1	48,5
2	9	41,3	50,9
3	11	38,5	45,1

Tabela 4 - Variação tempo de ciclo - Caminhão AD-45

Cenário	Velocidade Média (km/h)	Tempo de Ciclo (min) Estéril	Tempo de Ciclo (min) Minério
1	12	36,9	42,94
2	11	37,4	45,55
3	13	35,6	41,12

Tabela 5 - Variação tempo de ciclo - Caminhão A30F

Cenário	Velocidade Média (km/h)	Tempo de Ciclo (min) Estéril	Tempo de Ciclo (min) Minério
1	10	40,2	47
2	9	40,95	50,3
3	11	38,9	44

Tabela 6 - Movimentação total de material (ton)

Cenário	Movimentação Minério	Movimentação Estéril	Total Movimentado
1	89.420	61.610	151.030
2	85.390	59.940	145.330
3	92.180	62.380	154.560

Através dos dados apresentados nas tabelas anteriores é possível notar um grande impacto na produção da mina devido à variação da velocidade média dos equipamentos de carregamento e transporte. Nota-se que no cenário (2), com a redução na velocidade média obtém-se uma perda na movimentação total de 5700 ton, equivalente à 3,77% da produção mensal. Analisando-se o cenário (3), com o aumento da velocidade média obteve-se um ganho na movimentação total de 3530 ton, equivalente à 2,33%.

Outro dado importante fornecido pelo resultado da simulação foram os tempos de ciclo médio dos equipamentos operando tanto em minério quanto em estéril. Nota-se que com o aumento da velocidade média dos equipamentos ocorreu uma redução no tempo de ciclo médio, o que impacta positivamente a produção, pois com o tempo de ciclo menor, os caminhões são capazes de realizar mais ciclos na mina dentro do turno de trabalho.

É importante salientar também que, apesar do tempo de ciclo médio dos caminhões ter aumentado, o tempo de ciclo das carregadeiras permaneceu constante tanto após o aumento quanto após a redução. Isso se deve ao fato de a movimentação das carregadeiras ser limitada a pequenos espaços, já que estas apenas se locomovem dentro do realce para realizar as manobras para o enchimento da pá e o carregamento dos caminhões.

Com base nos resultados pode-se notar que a velocidade dos equipamentos na mina é de grande importância para a produção e também é dependente das condições de acesso e de pista da mina, que precisam ser monitoradas e mantidas em boas condições afim de evitar perdas na produção.

4.2.2. Adição do 4º turno

Conforme citado no capítulo anterior, simulou-se também a adição do quarto turno à jornada de trabalho, usando-se como base o planejamento da produção de

fevereiro/2018 para análise da variação da produção e da movimentação vertical e horizontal da mina. Os dados obtidos na simulação estão presentes na tabela 7 a seguir:

Tabela 7: Comparativo Produção (em ton) - 3 e 4 turnos – fevereiro/2018

Cenário	Programado		Material Movimentado		Total Movimentado
	Minério	Estéril	Minério	Estéril	
3 Turnos	98.133	67.442	89.420	61.610	151.030
4 Turnos	98.133	67.442	92.950	62.100	155.050

Nota-se que com a adição do quarto turno obteve-se um ganho na movimentação de minério de 3530 ton, um aumento equivalente à 3,95% e um ganho de 2,66%, se comparado com a operação em apenas 3 turnos.

Através dos resultados é possível concluir que ocorreu um aumento na produção com a adição do 4º turno à jornada de trabalho da mina, porém não é possível mensurar com precisão o quão relevante esse aumento irá impactar nos lucros da empresa, já que a adição de um quarto turno demanda vários fatores para empresa, como contratação de pessoal, transporte dos funcionários para a empresa, alimentação, entre outros aspectos.

4.2.3. Planejamento da produção para 2018

Conforme citado anteriormente, foi simulado também a produção da mina programada para o ano de 2018, visando analisar a robustez do modelo construído. Os resultados obtidos na simulação podem ser vistos na tabela 8 abaixo:

Tabela 8: Simulação Programação 2018

Cenário	Programado		Total Programado	Material Movimentado		Total Movimentado
	Minério	Estéril		Minério	Estéril	
Programação 2018	1.474.446	666.277	2.140.722	1.482.270	666.290	2.148.560

Analisando-se a tabela acima, é notável ver que a massa total movimentada obtida através da simulação apresentou valor próximo ao valor total programado,

estando apenas 7838 ton acima do valor programado, o que equivale a uma diferença de 0,37%.

É interessante salientar também que para a simulação deste cenário foi necessário o aumento do tempo processamento computacional dos dados, devido ao grande volume de informação necessária para que o modelo fosse simulado com boa precisão, tornando-o um cenário demorado para ser simulado, se comparado com os cenários anteriores.

4.3. Discussões

Através dos resultados obtidos com os cenários simulados é possível notar que o modelo está bem ordenado e é capaz de representar a realidade atual da mina com satisfatório grau de semelhança, mesmo em períodos mais longos, como no caso do planejamento da produção de 2018.

Com relação aos diversos cenários alternativos simulados, estes, além de ter o intuito de mostrar diversas realidades que possam ocorrer dentro da mina, também tiveram papel considerável na validação do modelo, pois a cada cenário simulado novas modificações eram feitas no intuito de refinar cada vez mais a ferramenta, buscando sempre torná-la cada vez mais complexa, sendo capaz de simular cenários diversos sem que haja a necessidade de criar um novo modelo.

Outro ponto relevante é que o modelo está sendo ajustado para que novos cenários específicos sejam simulados, a fim de conhecer realidades diferentes da mina, o que a torna uma ferramenta dinâmica. Até o momento, os cenários que aguardavam para serem simulados são:

- Retirada de estéril da mina via caminhões utilizando-se uma nova frota dedicada, visando diminuir a quantidade de estéril em excesso acumulada dentro da mina;
- Setorização das carregadeiras por níveis – uma quantidade pré-determinada de escavadeiras irá operar entre níveis pré-determinados para estas, evitando

que os equipamentos tenham que se deslocar por longas distâncias para mudança da frente de trabalho;

- Operação da britagem 24h e transferência de minério/estéril utilizando-se carregadeira semi-autônoma no entre-turnos, evitando perdas na produção durante as trocas de turno;
- Criação de um novo silo no nível 11 a 120 metros das grades, variando sua capacidade entre 3000, 4000 e 6000 toneladas, conforme análise da necessidade;
- Criação de novos pontos de aterro.

Como forma de controle do problema da gestão de estéril na mina, diversas medidas foram tomadas afim evitar perdas na produção e o surgimento de novos gargalos. Dentre as medidas, é possível citar a criação de uma rotina de elaboração e divulgação de um plano mensal de movimentação de estéril na mina, que é revisado semanalmente, definindo-se os pontos de origem e as áreas de deposição de material, considerando o nivelamento dos recursos (frota) necessários para se movimentar todo o material a ser produzido no período (estéril e minério).

No início do ano também foi realizada uma campanha na tentativa de mitigar o problema, dando destino para grandes massas de material que estavam distribuídas por toda a mina sem ter uma destinação definitiva, que poderiam gerar um grande impacto negativo para a produtividade da operação. Tal campanha teve efeito positivo, eliminando o gargalo gerado momentaneamente presente na mina.

Além disso, no decorrer do ano, devido a vários impactos operacionais, a taxa de desenvolvimento real vem sendo menor que o previsto para o ano. Assim, a quantidade esperada de estéril a ser gerada e conseqüentemente a necessidade de novas áreas de aterro ou de movimentação de estéril da mina para a superfície não se mostrou tão crítica quanto a prevista nos primeiros meses do ano. Portanto, o problema de acúmulo de estéril na mina não gerou, até o momento, perdas significativas ao processo, como restrições na produção, entre outras.

5. CONCLUSÃO

A partir do desenvolvimento do estudo neste trabalho é possível concluir que o modelo criado no Arena é considerado representativo, pois foi capaz de gerar resultados muito próximos da realidade atual da mina.

Através da simulação da variação da velocidade média dos equipamentos notou-se que ocorreu impacto nos tempos de ciclo dos caminhões, impactando diretamente a produção. Com o aumento da velocidade média dos caminhões a produção será impactada positivamente, aumentando a quantidade de minério e estéril produzidos, enquanto que com a redução da velocidade a produção é impactada de forma negativa;

Apesar da variação da velocidade média dos caminhões ter gerado impacto em seus tempos de ciclo, a variação na velocidade média das carregadeiras não gerou nenhum tipo de impacto notável nos tempos de ciclo destas, já que estas se deslocam por pequenas distâncias para efetuar o carregamento dos caminhões;

A adição do quarto turno apresentou ganhos na produção, pois reduz o tempo ocioso presente entre as trocas de turno ao sobrepor duas trocas de turno, fazendo que em um dia haja apenas duas paradas para as trocas, ao invés de três, como vinha sendo executado. Apesar do aumento da produção obtido através da simulação, ainda não é possível estimar se este aumento é significativo e se com esse aumento a adição de um 4º turno à jornada de trabalho será lucrativo para a empresa. Trabalhos mais aprofundados na questão devem ser feitos.

O modelo também foi capaz de simular a produção programada para todo o ano de 2018, mostrando ser um modelo robusto e adaptável, capaz até de simular cenários mais complexos e extensos.

Por fim, apesar de todo tempo investido na construção do modelo, foram necessárias novas medidas para realizar efetuar o controle da movimentação e gestão do estéril na mina, afim de evitar a ocorrência de perdas na produção. Além disso, o desenvolvimento de galerias na mina vem ocorrendo a um ritmo inferior ao previsto no início do ano, o que contribuiu para que quantidades menores de estéril fossem

geradas, reduzindo a possibilidade de geração de novos acúmulos de estéril sem destinação final espalhados pela mina.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Realizar as simulações sugeridas no capítulo 4, que ainda não foram simuladas;

Fazer análise estatística mais aprofundada nos resultados obtidos para conhecer a real relevância dos resultados e o impacto atrelado a eles.

7. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

HARTMAN, H.L.; MUTMASKY, J.M. Introductory Mining Engineering. 2ª ed. Editado por John Wiley & Sons, 2002.

RAYMOND L. LOWRIE, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (U.S.) - 2011 - Technology & Engineering

COSTA.B, GANGA.G.M.D. Benefícios da Implantação de um Sistema de Despacho: Estudo de caso em uma empresa de mineração. Enegep, 2010.

CUNHA, C.B. Aspectos práticos da aplicação de modelos de roteirização de veículos a problemas reais. *Revista Transportes da ANPET – Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes*. São Paulo, v.8, n.2, p.51-74, 2000

Hassani, F., Archibald J.H. (1998). "Mine Backfill". CIM, CD-ROM.

PARMENTER,D. Key Performance Indicators: developing, implementing, and using winning KPIs. John Wiley & Sons, 2007.

_____. O que é simulação. Disponível em: <http://www.paragon.com.br/academico/o-que-e-simulacao/> Acesso em 25 mai 2018.

_____. Smartmine UG. Disponível em: <https://hexagonmining.com/products/all-products/smartmine-ug> Acesso em 31 mai 2018.

_____. Mineração de Ouro. Disponível em: <http://www3.anglogoldashanti.com.br/negocios/Paginas/Mineracao-de-Ouro.aspx> Acesso em: 09 out 2018

TURNER, R. J. "Simulation in the mining industry of South Africa", International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment 13, 47-56, 1999.

ALARIE, S. e GAMACHE, M. "Overview of Solution Strategies Used in Truck Dispatching Systems for Open Pit Mines", International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment 16, 59-76, 2002.

SOUZA, M. J. F., COELHO, V. N., COELHO, I. M., RIBAS, S. Planejamento operacional de lavra, Relatório Técnico-Científico Final, UFOP, 2011.

BARBOSA, K. J. Avaliação geotécnica de lavra subterrânea do corpo Serrotinho da mina Cuiabá através de modelagem numérica tridimensional. Dissertação de mestrado, UFOP, 2011