

UM MODELO DE SIMULAÇÃO NO ARENA PARA O SEQUENCIAMENTO E REDUÇÃO DO TEMPO DAS VIAGENS DOS CAMINHÕES EM UMA MINA A CÉU ABERTO

GUIDO PANTUZA JR

guido.junior@ifmg.edu.br

INSTITUTO FEDERAL DE MINAS GERAIS - IFMG

MARCONE JAMILSON FREITAS SOUZA

marcone@iceb.ufop.br

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO - UFOP

Resumo: ESTE TRABALHO APRESENTA UM MODELO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA A ETAPA DE SEQUENCIAMENTO DE CAMINHÕES DO PROBLEMA DE PLANEJAMENTO OPERACIONAL DE LAVRA EM MINAS A CÉU ABERTO. NESTE PROBLEMA CONSIDERA-SE A EXISTÊNCIA DE UMA FROTA HETEROGÊNEA DE CAMINHÕES, A EXISTÊNCIA DE DOIS PONTOS DE DESCARGA PARA O MATERIAL LAVRADO, SENDO O BRITADOR PARA DESCARGA DE MINÉRIO E A PILHA DE ESTÉRIL PARA DESCARGA DE ESTÉRIL. O TEMPO DE CICLO DOS EQUIPAMENTOS TAMBÉM FOI CONSIDERADO COMO UM PARÂMETRO QUE DEPENDE DA FRENTE DE LAVRA, DO TIPO DE CAMINHÃO E DO TIPO DE MATERIAL TRANSPORTADO. PARA SUA RESOLUÇÃO, FOI PROPOSTO UM MODELO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL, SENDO ESTE IMPLEMENTADO NO SOFTWARE ARENA. O MODELO IMPLEMENTADO É CAPAZ DE GERAR UMA SEQUÊNCIA DE VIAGENS DOS CAMINHÕES A PARTIR DE UMA PROGRAMAÇÃO DE PRODUÇÃO PRÉ-ESTABELECIDO. A PARTIR DOS RESULTADOS OBTIDOS, PODE-SE VERIFICAR QUE O MODELO MOSTROU-SE ADEQUADO PARA DETERMINAR UM PLANO DE VIAGENS DOS CAMINHÕES, COM REDUÇÃO NO TEMPO TOTAL.

Palavras-chaves: PLANEJAMENTO DE LAVRA; SEQUENCIAMENTO DE CAMINHÕES; SIMULAÇÃO; ARENA.

A SIMULATION MODEL IN ARENA FOR THE SCHEDULING AND REDUCTION THE TRAVEL TIME OF TRUCKS IN AN OPEN PIT MINE.

Abstract: *THIS PAPER PRESENTS A COMPUTATIONAL SIMULATION MODEL TO STEP SCHEDULING OF THE TRUCKS TO THE OPEN PIT MINE OPERATIONAL PLANNING PROBLEM. IN THIS PROBLEM WE CONSIDER THE EXISTENCE OF A HETEROGENEOUS FLEET OF TRUCKS, THE EXISTENCE OF TWO DISCHARGE POINTS FOR THE MATERIAL MINED, BEING THE PRIMARY CRUSHER TO DISCHARGE OF ORE AND WASTE DUMP FOR DISCHARGE OF WASTE. THE CYCLE TIME OF EQUIPMENT WAS ALSO CONSIDERED AS A PARAMETER THAT DEPENDS ON THE PIT, THE TYPE OF TRUCK AND TYPE OF MATERIAL TRANSPORTED. IN ITS RESOLUTION, WAS PROPOSED A COMPUTATIONAL SIMULATION MODEL, WHICH IS IMPLEMENTED IN THE SOFTWARE ARENA. THE IMPLEMENTED MODEL IS ABLE TO GENERATE A SEQUENCE OF TRIPS OF THE TRUCKS FROM A PROGRAMMING OF THE PRODUCTION PRE-ESTABLISHED. FROM THE RESULTS OBTAINED, IT CAN BE SEEN THAT THE MODEL WAS ADEQUATE TO DETERMINE A PLAN OF TRAVEL OF THE TRUCKS, REDUCING THE TOTAL TIME.*

Keyword: *MINE PLANNING; TRUCKS SCHEDULING; SIMULATION; ARENA.*

1. Introdução

A contínua otimização dos processos produtivos, por redução de custos e aumento da produção, é essencial para garantir a competitividade das empresas. No setor mineral, os custos e volumes de produção estão intimamente ligados ao planejamento operacional de lavra.

O planejamento operacional de lavra consiste em determinar o ritmo de lavra de cada frente, ou seja, ao número de viagens a serem realizadas por cada caminhão em cada frente de lavra. Este ritmo deve atender algumas especificações, tais como a percentagem de determinados elementos químicos ou a granulometria do minério, a quantidade de minério a ser lavrado, além da determinação da quantidade e tipo de caminhões que deverão ser carregados em cada frente de lavra.

O planejamento de lavra envolve, pois, o gerenciamento dos equipamentos de carga e transporte (COSTA *et al.*, 2005), ou seja, a determinação da frente de minério que certo equipamento de carga será alocado, assim como a sequência de viagens que cada caminhão fará a essas frentes.

Como esse problema envolve atividades complexas e alocação de alto volume de investimentos, as decisões devem ser tomadas com base em critérios científicos bem definidos.

Entre as ferramentas que auxiliam na tomada de decisões, destacamos a Pesquisa Operacional (PO). Segundo Arenales *et al.* (2007), ela consiste na aplicação de métodos científicos para auxiliar no processo de tomada de decisões, por exemplo como operar sistemas produtivos que requerem alocações eficientes de recursos escassos. Dentre estes métodos de análises destacamos a simulação computacional.

Entre as diversas definições, Pedgen *et al.* (1990) afirmam que a simulação é um processo de modelagem computacional de um sistema real, e condução de experimentos com este modelo almejando o entendimento de seu comportamento e/ou avaliação de estratégias para sua operação.

A simulação baseia-se na utilização de certas técnicas matemáticas, empregadas em computadores, as quais permitem imitar o funcionamento de uma operação ou processo do mundo real, ou seja, é o estudo do comportamento de sistemas reais através da utilização de modelos.

O foco deste trabalho é na etapa de sequenciamento dos caminhões utilizando a simulação. Esta é uma etapa do problema de planejamento operacional de lavra, que surge após a alocação dos equipamentos de carga e transporte às frentes de lavra. Essa primeira etapa é feita pela aplicação de um modelo de programação matemática, descrito em Pantuza Jr. (2011), o qual não contempla incertezas, como a variabilidade nos tempos de ciclo dos caminhões e a existência de fila nas frentes de lavra.

O artigo está organizado como segue. Na seção 2, descreve-se o problema em estudo. Na seção 3 as referências bibliográficas. Na seção 4, apresenta-se o modelo de simulação utilizado. A apresentação dos cenários é feita na seção 5. A seção 6 apresenta os resultados obtidos e suas respectivas análises. A conclusão é apresentada na seção 7.

2. Problema em estudo

As empresas do setor mineral realizam suas atividades em minas subterrâneas ou a céu aberto. Em uma mina a céu aberto, o planejamento operacional de lavra consiste,

principalmente, na programação da produção.

A programação da produção envolve as atividades de carregamento e transporte do minério (material com valor econômico) e do estéril (material sem valor econômico).

Segundo Rodrigues (2006), essas atividades ocorrem da seguinte forma: os caminhões se deslocam até a frente de lavra, que são os pontos da mina onde o minério e o estéril estão sendo retirados, são carregados pelos equipamentos de carga e em seguida se deslocam para os pontos de descarga, onde descarregam o minério e o estéril. Esses pontos de descarga podem ser pilhas de estéril ou o britador primário (minério). O minério, após ser levado para britador primário, irá para a usina de beneficiamento. Além disso, esse minério deve atender a determinadas condições para que o beneficiamento ocorra, ou seja, os teores de cada variável de controle devem estar entre os limites inferior e superior preestabelecidos para cada uma delas.

Segundo Penna (2009), o planejamento operacional de lavra pode ser dividido em várias etapas, a saber: a mistura de minérios; a alocação dos equipamentos de carga (carregadeiras) e transporte (caminhões); e o sequenciamento (ou despacho) dos caminhões.

De acordo com Chanda e Dagdelen (1995), a mistura de minérios consiste em determinar a quantidade de minério, ou estéril, que será retirada de cada frente. Isto é necessário para fornecer minério de qualidade uniforme para o processo.

Conforme Costa *et al.* (2005), a alocação dos equipamentos de carga e transporte consiste na alocação das carregadeiras às frentes que foram selecionadas e na determinação do número de viagens de cada caminhão a cada frente.

O sequenciamento de caminhões, por sua vez, visa à determinação da sequência de viagens de cada caminhão a cada frente.

Segundo Rodrigues (2006), o objetivo do sequenciamento é maximizar o tempo total produtivo da mina, minimizar a quantidade de caminhões necessária para o transporte, maximizar a produção dos equipamentos de carga e atender os padrões de qualidade da usina de tratamento.

O problema do sequenciamento dos caminhões, objeto de estudo deste trabalho, inicia-se depois de cumpridas as etapas de mistura e alocação. Ou seja, depois de determinadas as frentes que serão utilizadas, e o número de viagens que cada caminhão irá realizar a cada frente para uma hora, como exemplificado pela Figura 1, deve-se determinar em que sequência essas viagens de cada caminhão serão realizadas.

<i>Frente</i>	<i>Carga</i>	<i>Cam₁</i>	<i>Cam₂</i>	...	<i>Cam_v</i>
<i>F₁</i>	<i>C₁</i>	3	0	...	1
<i>F₂</i>	<i>C₂</i>	1	0	...	0
<i>F₃</i>	<i>D</i>	0	0	...	0
⋮	⋮	⋮	⋮	...	⋮
<i>F_F</i>	<i>C₃</i>	0	0	...	2

FIGURA 1: Número de viagens de cada caminhão a cada frente

Na Figura 1 observa-se que a coluna **Frente** representa as frentes de lavra disponíveis e a coluna **Carga** as carregadeiras utilizadas. Nas demais colunas encontram-se os caminhões disponíveis e o respectivo número de viagens de cada um a cada frente. Por exemplo, na linha

F_1 tem-se a frente de lavra F_1 e que a carregadeira C_1 foi alocada a ela. Nas demais colunas da linha F_1 podemos observar que o caminhão Cam_1 irá realizar três viagens, o caminhão Cam_2 não realizará viagens e o caminhão Cam_V irá realizar 2 viagens, todas à frente F_1 . Na linha F_3 , coluna **Carga**, a letra 'D' significa que nenhuma carregadeira foi alocada frente F_3 .

Um exemplo de solução para o problema de sequenciamento de caminhões é apresentado na Figura 2.

CAM	Frentes					
Cam_1	F_1	F_2	F_1	F_1	...	x
Cam_2	x				...	
...	...	...	...	...	...	...
Cam_V	F_F	F_1	F_F	x	...	

FIGURA 2: Representação de uma solução.

Na Figura 2 temos a coluna **CAM**, na qual se encontram os caminhões disponíveis e nas demais colunas, o seu plano de viagens para uma hora. Por exemplo, o caminhão Cam_V irá realizar a primeira viagem até a frente F_F , a segunda viagem à frente F_1 , a terceira viagem será novamente à frente F_F e a letra 'x' indica que o caminhão não possui mais viagens para realizar dentro do tempo previsto.

Diferentemente de outros trabalhos encontrados na literatura tais como Costa *et al.* (2005) e Coelho *et al.* (2008), e procurando desenvolver modelos que se aproximem mais da realidade das minas, neste trabalho também se consideram dois pontos de descarga para o material lavrado. Tais pontos de descarga são o britador primário para descarga de minério e a pilha de estéril para descarga de estéril.

Também para se aproximar mais da realidade, adota-se o tempo de ciclo dos equipamentos como sendo uma variável que depende da distância do ponto de descarga à frente de lavra, do tipo de caminhão e do tipo de material transportado (minério ou estéril). Isto se justifica porque cada modelo de caminhão normalmente leva um tempo diferente para percorrer um mesmo trajeto e este tempo também é influenciado pelo tipo de carga (minério ou estéril).

3. Revisão bibliográfica

Segundo Rodrigues (2006), a simulação é cada vez mais utilizada na mineração. Ela consiste em uma ferramenta que pode ajudar no melhoramento de operações de qualquer porção específica de uma mina e proporciona uma rápida avaliação de custos das operações complexas da mineração, como o projeto de uma mina ou o planejamento operacional.

Segundo Chironis (1985), o primeiro sistema para o sequenciamento de caminhões na mineração foi implementado em mina de cobre no ano de 1975. Depois dessa data é possível encontrar diversos trabalhos na literatura que tratam da simulação e do problema de sequenciamento de caminhões na mineração.

Tu e Hucka (1985) desenvolveram um modelo de simulação para analisar a produtividade de uma operação de caminhão/carregadeira em uma mina a céu aberto. Além de permitir a análise das operações dos caminhões e das carregadeiras, o modelo também pode ser usado para avaliar diferentes arranjos de redes de transporte na fase de planejamento e/ou para comparar a performance esperada de alternativas de sistemas de despacho (sequenciamento) de caminhões.

Segundo White *et al.* (1993), no setor mineral, a simulação é mais utilizada para avaliação e comparação. Panagiotou (1999) afirma que as aplicações mais comuns no setor mineral são em sistemas de otimização e dimensionamento ou tomada de decisão. Para Vagenas (1999), a simulação vem sendo utilizada no setor mineral principalmente nos sistemas de transporte, nas operações e nos planejamentos das minas, e no sequenciamento da produção.

Merschmann (2002) desenvolveu um sistema computacional de otimização e simulação para o problema de planejamento operacional de lavra chamado OTISIMIN. O sistema de simulação utiliza o resultado do modelo de otimização. O modelo de programação linear utilizado na otimização não considera as metas qualidade, bem como a minimização do número de caminhões utilizados.

Ramos Neto e Pinto (2004) desenvolveram um Template, conjunto de módulos, chamado Mineração 1.0, para utilização no programa ARENA, visando facilitar a modelagem e a simulação de operações de carregamento e transporte em minas a céu aberto. O Template prevê as atividades de carga, descarga, deslocamento vazio e carregado dos caminhões, além de paradas para manutenção dos equipamentos de carga e transporte, bem como a alocação estática e dinâmica de caminhões. Na alocação estática um determinado caminhão só pode realizar viagens a uma mesma frente. Na alocação dinâmica, um caminhão pode realizar viagens a diferentes frentes.

Rodrigues (2006) realizou uma análise comparativa das metodologias utilizadas para o despacho de caminhões em minas a céu aberto. Essas metodologias constituem as bases dos algoritmos utilizados nos sistemas de despacho comercializados no Brasil. A simulação foi utilizada com o objetivo de reproduzir o comportamento das operações de lavra.

Guimarães *et al.* (2007) desenvolveram um modelo de simulação computacional para validar resultados obtidos pela aplicação de um modelo de programação matemática na determinação do ritmo de lavra em minas a céu aberto. Neste problema, sabe-se que cada frente possui características de qualidade diferentes e que o ritmo de lavra deve ser realizado de forma proporcional, gerando uma alimentação que atenda as metas de qualidade e produção preestabelecidas. Para atender esses objetivos utilizou-se a técnica de programação linear por metas, e para analisar a possibilidade de implantação dos resultados fez-se uso da simulação computacional.

Além destes citados, outros trabalhos também podem ser encontrados na literatura tais como: Pereira (1992), Ezawa e Silva (1995), Pinto (1999), Turner (1999), Meyer (2002) e Saayman (2005).

4. Modelo de Simulação

Para a implementação e análise do modelo de simulação utilizou-se a metodologia proposta por Andrade (2000), ilustrada na Figura 3.

Para o modelo implementado, tomou-se cada caminhão como uma entidade diferente para facilitar a análise dos resultados, sendo cada entidade chamada de *Cam_l*, adotando *l* como o número do caminhão.

Estas entidades recebem os seus respectivos atributos, sendo: *tempo de deslocamento minério*; *tempo de deslocamento estéril*; *tempo de deslocamento britador*; *tempo de deslocamento pilha*; *capacidade de minério*; *capacidade de estéril*; *número de viagens*; *tempo de carga*; *tempo de descarga*.

O atributo *tempo de deslocamento minério* é o tempo de deslocamento, em minutos, do caminhão Cam_i carregando minério, a partir da frente F_i até o britador primário. O atributo *tempo de deslocamento estéril* é o tempo de deslocamento, em minutos, do caminhão Cam_i carregando estéril, a partir da frente F_i até a pilha de estéril.

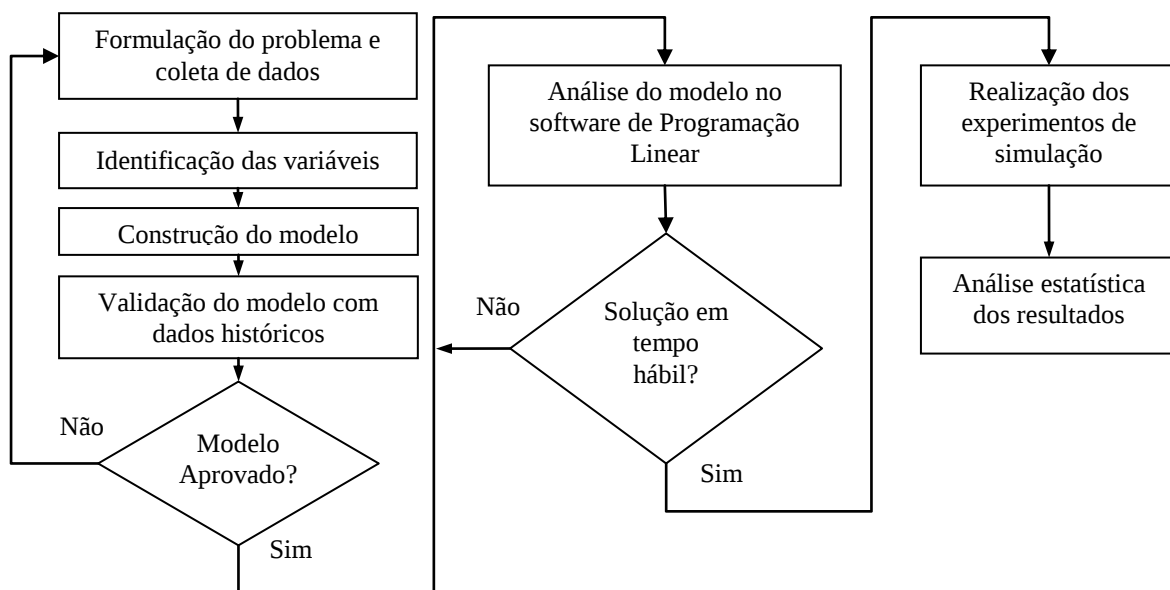


FIGURA 3: Etapas de um sistema de Simulação

Os atributos *tempo de deslocamento britador* e *tempo de deslocamento pilha* representam o tempo de deslocamento do Cam_i a partir do britador e da pilha de estéril, respectivamente, até a frente F_i .

As capacidades de carga de minério e estéril, em toneladas, são atribuídas ao Cam_i através do atributo *capacidade de minério* e *capacidade de estéril*, respectivamente.

O atributo *número de viagens* determina o número de viagens que cada Cam_i deve realizar a cada frente F_i . Os tempos de carregamento e descarregamento do Cam_i são definidos pelos atributos *tempo de carga* e *tempo de descarga*, respectivamente.

O modelo de simulação proposto foi implementado no *software* de simulação ARENA por meio de submodelos.

No primeiro submodelo, “Cria Inicializa Entidades”, as entidades (caminhões) são definidas e seus respectivos atributos são definidos. Esses atributos, tais como, tempo de viagem de cada caminhão a cada frente, tempo de carga e descarga, capacidade de transporte e número de viagens a cada frente (determinado pelos modelos exato e heurístico) são lidos pelo modelo a partir de arquivos de texto. Além destes atributos, um número de série único para cada caminhão também é deliberado. Este número é utilizado pelo modelo para rastreamento do caminhão durante a simulação e utilizado para coletar o sequenciamento dos caminhões proposto pelo modelo. Após a inicialização de todas as entidades, estas seguem para o submodelo “Roteador de Veículos”.

Através deste submodelo é garantido que um caminhão somente realizará viagens às frentes predeterminadas pelo programa de produção definido pelo modelo de otimização (exato ou heurístico). O roteador de veículos também é responsável pelo sequenciamento dos caminhões. O roteador escolhe a próxima frente na qual o caminhão deverá realizar sua próxima viagem.

Para esta escolha, ele pode considerar o menor número de caminhões na fila de uma frente, menor número de caminhões em rota para uma frente ou ambos somados. Depois de definida a frente que o caminhão deve visitar, ele seguirá para o próximo submodelo. Este submodelo pode ser “Frentes de Minério” ou “Frentes de Estéril”.

Cada um destes submodelos é composto por um conjunto de frentes, de minério se for “Frentes de Minério” e estéril se for “Frentes de Estéril”. Cada frente foi definida como uma estação de trabalho composta por um processo de carregamento de material (minério ou estéril) utilizando o recurso Carregadeira. Também é coletado o instante que o cada caminhão visita cada frente e registrado em um arquivo texto, conjuntamente com seu número de série.

Dessa forma, é possível coletar a sequência de visitas de cada caminhão a cada frente e seu instante. O caminhão carregado deve seguir para um ponto de descarga. Cada ponto de descarga caracteriza um submodelo diferente, sendo: “Britador Primário” para o caminhão carregado com minério e “Pilha de Estéril” para o caminhão com estéril. Em seguida, o caminhão se direciona novamente para o “Roteador de Veículos” e repete todo o processo até que não haja mais viagens a ele alocadas.

5. Descrição dos cenários

Para testar o modelo proposto na seção 4, foram consideradas quatro minas virtuais. Tais instâncias-teste foram adaptadas daquelas encontradas em www.decom.ufop.br/prof/marcone/projects/mining.html, usadas em Souza *et al.* (2010).

As instâncias diferem entre si pelo número de caminhões, número de carregadeiras, número de frentes de lavra e número de parâmetros de controle da qualidade do minério. Elas são compostas por uma frota heterogênea com três modelos diferentes de caminhões, ou seja, caminhões com diferentes características de capacidade e velocidade. Sendo que a capacidade de carga varia de acordo com o material transportado (minério ou estéril). Quanto às frentes de lavra, cada uma possui diferentes características em relação ao teor do minério e dos parâmetros de qualidade.

Além das instâncias, os diferentes cenários diferem entre si pelas frentes utilizadas e pelo número de viagens que cada caminhão deve realizar a cada frente, ou seja, pela programação da produção. Eles também diferem entre si pelo critério de decisão para o sequenciamento dos caminhões e pela metodologia adotada para redução do tempo total de ciclo.

Os cenários considerados são descritos na Tabela 1. A coluna **Cenários** apresenta o número de cada cenário utilizado. A coluna **Instância** indica qual instância-teste foi utilizada como base para o cenário. A coluna **Critério de Decisão** mostra qual critério de decisão foi considerado para o sequenciamento dos veículos. Os critérios adotados para escolha da próxima frente F_i a ser visitada pelo caminhão Cam_l , são os seguintes:

- *Fila*: é escolhida a frente que possuir menor número de entidades em fila;
- *Rota*: é escolhida a frente que possuir menor número de entidades em rota para a frente;
- *Fila e Rota*: é escolhida a frente que possuir menor número de entidades na fila e em rota para as frentes somadas;

TABELA 1 – Descrição dos cenários

<i>Cenários</i>	<i>Instância</i>	<i>Critério de Decisão</i>	<i>Tempo de Ciclo</i>
1	<i>Mina 1</i>	<i>Fila</i>	-
2	<i>Mina 1</i>	<i>Rota</i>	-
3	<i>Mina 1</i>	<i>Fila e Rota</i>	-
4	<i>Mina 2</i>	<i>Fila</i>	-
5	<i>Mina 2</i>	<i>Rota</i>	-
6	<i>Mina 2</i>	<i>Fila e Rota</i>	-
7	<i>Mina 4</i>	<i>Fila</i>	-
8	<i>Mina 4</i>	<i>Rota</i>	-
9	<i>Mina 4</i>	<i>Fila e Rota</i>	-
10	<i>Mina 1</i>	<i>Fila e Rota</i>	<i>Menor</i>
11	<i>Mina 1</i>	<i>Fila e Rota</i>	<i>Inativo</i>
12	<i>Mina 2</i>	<i>Fila e Rota</i>	<i>Menor</i>
13	<i>Mina 2</i>	<i>Fila e Rota</i>	<i>Inativo</i>
14	<i>Mina 3</i>	<i>Fila e Rota</i>	-
15	<i>Mina 3</i>	<i>Fila e Rota</i>	<i>Menor</i>
16	<i>Mina 3</i>	<i>Fila e Rota</i>	<i>Inativo</i>
17	<i>Mina 4</i>	<i>Fila e Rota</i>	<i>Menor</i>
18	<i>Mina 4</i>	<i>Fila e Rota</i>	<i>Inativo</i>

O número de viagens de cada caminhão a cada frente foi inicialmente fixado para ser cumprido em uma hora. Para os cenários cuja programação da produção não foi possível completar no tempo previsto de uma hora com a aplicação da simulação, foi retirada uma viagem do caminhão Cam_i à frente F_i com o maior número de viagens e, quando possível, realocada para outro caminhão com um número menor de viagens (**Menor**) e com as mesmas características, ou para um caminhão também com as mesmas características que estava inativo (**Inativo**), mantendo a viagem para a mesma frente F_i .

Com essa metodologia manteve-se as características finais, como qualidade e quantidade do minério, previstas pela programação da produção previamente definida.

6. Resultados e análise

O modelo de simulação proposto foi implementado no *software ARENA*, versão 13.0. Os testes foram realizados em um microcomputador com processador *Intel Pentium 4*, com 2.0 GHz e 1 GB de *RAM* sob plataforma *Windows XP*.

Como os tempos de ciclo e parâmetros das instâncias utilizadas no modelo são todos determinísticos, ele foi executado para cada cenário uma única vez.

Para determinar a programação da produção, ou seja, a alocação dos equipamentos de carga e transporte às frentes de lavra, foi utilizado o modelo de programação linear por metas proposto por Pantuza Jr. (2011). Este modelo considera o tempo de ciclo relacionado com o tipo do caminhão, com a distância da frente de lavra em relação aos pontos de descarga e com o tipo de material transportado (minério ou estéril). Ele também considera dois pontos de descarga (britador e pilha de estéril).

O modelo de programação matemática foi implementado no aplicativo de otimização *LINGO* 10.0, interfaceando com planilhas do *EXCEL* 2007. Dada a dificuldade de resolução do problema na otimalidade em tempo computacional hábil, em vista de o problema ser da classe NP-difícil (Costa, 2005), são utilizados os valores encontrados em 300 segundos de execução para todos os cenários.

A Figura 4 apresenta os resultados para o modelo de simulação computacional variando apenas o critério de decisão para o sequenciamento dos caminhões.

Na Figura 4 são apresentados os cenários 1 a 9 e suas respectivas instâncias-teste. Para cada instância (Mina) foi considerado um plano de viagem diferente, variando-se apenas o critério de decisão para o sequenciamento de caminhões. Por exemplo, para a Mina 1, cenários 1 ao 3, cada caminhão deve fazer as mesmas viagens, porém o critério utilizado para o sequenciamento é diferente, sendo: menor fila, cenário 1; menor número de caminhões em rota, cenário 2; e ambos somados, cenário 3.

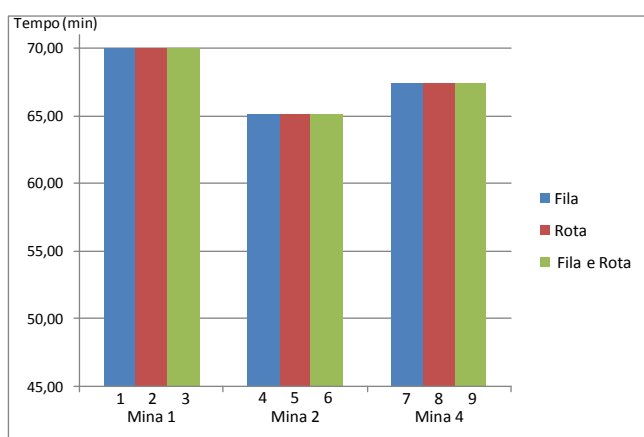


FIGURA 4: Critério de sequenciamento dos caminhões.

Observa-se que não houve alteração no tempo necessário (eixo vertical em minutos) para completar o plano de viagens ao alterar o método de sequenciamento de veículos entre menor fila para a frente de lavra, menor número de caminhões em rota para a frente de lavra ou os dois somados. Por isso, para o demais cenários foram considerados, como critério de decisão para o sistema de seqüenciamento (despacho) de caminhões, apenas menor fila e rota somados (*Fila e Rota*).

Na Figura 5, as colunas *Origem* indicam o tempo total gasto pelo modelo de simulação para completar o plano de viagens dos caminhões. As colunas *Menor* e *Inativo* apontam o valor do tempo total gasto pelo modelo de simulação para completar o plano de viagens de acordo com a metodologia descrita na seção 4. O eixo horizontal indica a instância utilizada e seu respectivo cenário.

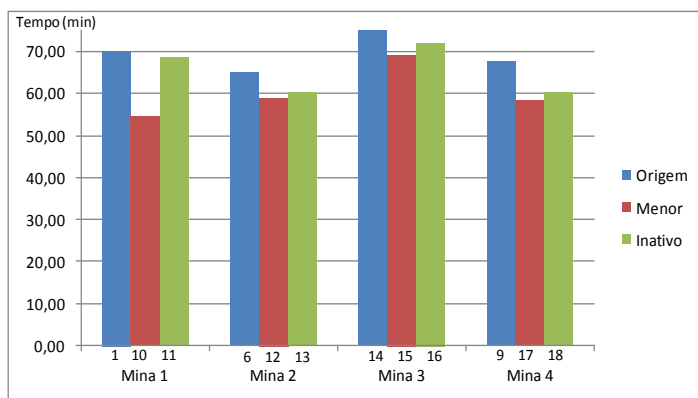


FIGURA 5: Critério de sequenciamento dos caminhões.

De acordo com a Figura 5, percebe-se que as duas metodologias adotadas, *Menor* e *Inativo*, conseguiram diminuir o tempo total de ciclo dos caminhões em todas as instâncias. Também observa-se que a metodologia *Menor* conseguiu uma maior redução se comparada com a metodologia *Inativo* em todas as instâncias testadas.

7. Conclusões

Este trabalho tratou a etapa de sequenciamento de caminhões do problema de planejamento de lavra em minas a céu aberto. O objetivo desse problema é maximizar a produtividade da mina, minimizar a quantidade de caminhões, maximizar a produção dos equipamentos de carga e atender os padrões de qualidade da usina de tratamento. Ou seja, propor a sequência de viagens (plano de viagens) de cada caminhão a cada frente de lavra para completar a programação da produção proposto no tempo menor possível.

Para tornar o modelo mais aplicável foram considerados, ao contrário de outros trabalhos anteriores, dois pontos de descarga diferentes, capacidades diferentes para as cargas de minério e estéril dos caminhões, além do tempo de ciclo dos caminhões dependente da distância entre as frentes de lavra e os pontos de descarga, do tipo de carga (se minério ou estéril) e do tipo de caminhão. Considerou-se também que a frota de equipamentos de carga é heterogeneia, ou seja, com diferentes taxas de utilização e produção, entretanto os tempos médios de carregamento são semelhantes, mesmo para diferentes caminhões.

Neste trabalho, desenvolveu-se um modelo de simulação computacional. Esse modelo utiliza a programação da produção obtida e verifica se é possível cumpri-lo dentro do tempo previsto de uma hora e retorna a sequência de visitas dos caminhões (plano de viagens). Caso não seja possível cumprir programação da produção proposta no tempo previsto, a programação é alterada a fim de que ela seja executada dentro do tempo previsto.

Essas alterações consistem em: 1) mudar o número de viagens do caminhão mais sobrecarregado para outro caminhão ativo e 2) mudar o número de viagens do caminhão mais sobrecarregado para outro caminhão inativo.

Pelos testes realizados percebe-se que nem sempre é possível cumprir a programação da produção no tempo previsto. Para amenizar esse problema do tempo, constatamos que ao contrário do que geralmente é feito, aumentar o número de caminhões no processo, devemos buscar um número reduzido e com uma alta taxa de utilização para melhores resultados. Acreditamos que isto se dá pelo fato que se aumentarmos o número de caminhões, o tempo de fila dos mesmos também aumentará, diminuindo a sua taxa de utilização.

Como trabalhos futuros, para tornar a solução mais aplicável à realidade operacional, ainda poderiam ser consideradas algumas variações de cenário que não foram previstas no modelo atual. Uma dessas variações do processo pode ser a variação na velocidade do caminhão devido às mudanças climáticas, como a chuva por exemplo.

Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES e a FAPEMIG pelo apoio ao desenvolvimento desta pesquisa.

Referências

- ANDRADE, E. L. de. *Introdução à Pesquisa Operacional*. Rio de Janeiro: LTC Livros Técnicos e Científicos - Editora S.A., 2000.
- ARENALES, Marcos. *et al. Pesquisa operacional: para cursos de engenharia*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.
- CHANDA, E. K. C. e DAGDELEN, K. Optimal blending of mine production using goal programming and interactive graphics systems. *International journal of surface mining, reclamation and environment*, v. 9, p. 203-208, 1995.
- CHIRONIS, N. P. Computer Monitors and Controls all Truck-Shovel Operations. *Coal Age*, v. 90:3, p. 50-55, 1985.
- COELHO, I. M.; RIBAS, S.; SOUZA, M. J. F. *Um algoritmo baseado em GRASP, Iterated Local Search para a otimização do planejamento operacional de lavra*. In: XI Encontro de Modelagem Computacional, Volta Redonda – RJ, 2008.
- COSTA, F. P.; SOUZA, M. J. F. e PINTO, L. R. Um modelo de programação matemática para alocação estática de caminhões visando ao atendimento de metas de produção e qualidade. *Revista da Escola de Minas*, v. 58, p. 77-81, 2005.
- EZAWA, L. e SILVA, K. S. *Alocação dinâmica de caminhões visando qualidade*. In: VI Congresso Brasileiro de Mineração, Belo Horizonte – MG, 1995.
- GUIMARÃES, I. F., PANTUZA JR e G.; SOUZA, M. J. F. *Modelo de simulação computacional para validação dos resultados de alocação dinâmica de caminhões com atendimento de metas de qualidade e de produção em minas a céu aberto*. In: XIV Simpósio de Engenharia de Produção – SIMPEP, Bauru – SP. 2007.
- MERSCHMANN, L. H. C. *Desenvolvimento de um sistema de otimização e simulação para análise de cenários de produção em minas a céu aberto*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, 2002.
- MEYER, M. F. *Análise de cenários envolvendo operações de carregamento e transporte em uma mina a céu aberto utilizando simulação*. 85 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral – PPGEM, Universidade Federal de ouro Preto – UFOP, Ouro Preto – MG, 2002.
- PANAGIOTOU, G. N. Discrete mine system simulation in Europe. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, v. 13, p. 43-46, 1999.
- PANTUZA JR, G. *Métodos de otimização multiobjetivo e de simulação aplicadas ao problema de planejamento operacional de lavra em minas a céu aberto*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, Ouro Preto – MG, 2011.
- PEGDEN, C. D. SHANNON, R.E e SADOWSKI, R.P. *Introduction to Simulation Using SIMAN*. New York: McGraw-Hill, 1990.
- PENNA, P. H. V. *Um algoritmo heurístico híbrido para minimizar os custos de a antecipação e o atraso da produção em ambientes com janela s de entrega e tempos de preparação dependentes da sequência*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral – PPGEM, Universidade Federal de ouro Preto – UFOP, Ouro Preto – MG, 2009.

- PEREIRA, G. G. *Sistema Computacional de Alocação Dinâmica de Caminhões – SCADC*. In: V Seminário Nacional: O computador e sua Aplicação no Setor Mineral, p. 295-310, Belo Horizonte – MG, 1992.
- PINTO, L. R. *Metodologia de análise do planejamento de lavra de minas a céu aberto baseada em simulação das operações de lavra*. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, 1999.
- RAMOS NETO, A. N. e PINTO, L. R. Template do programa Arena para simulação das operações de carregamento e transporte em minas a céu aberto. *Revista Escola de Minas*, v. 57(1), p. 65-69, 2004.
- RODRIGUES, L. F. *Análise comparativa de metodologias utilizadas no despacho de caminhões em minas a céu aberto*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte – MG, 2006.
- SAAYMAN, P.; CRAIG, I.K. e CAMISANI-CALZOLARI, E. Optimization of an autonomous vehicle dispatch system in an underground mine. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, v. 106:2, p. 77-86, 2006.
- Souza, M. J. F.; Coelho, I. M.; Ribas, S.; Santos, H. G. e Merschmann, L. H. C. A hybrid heuristic algorithm for the open-pit-mining operational planning problem. *European Journal of Operational Research*, v. 207, p. 1041-1051, 2010.
- TU, J. H. e HUCKA, V. J. Analysis of open-pit truck haulage system by use of a computer model. *CIM Bulletin*, v. 78, n. 879, p. 53-59, 1985.
- TURNER, R. J. Simulation in the mining industry of South Africa. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, v. 13, n. 2, p. 47-56, 1999.
- VAGENAS, N. Applications of discrete-event simulation in Canadian mining operations in the nineties. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, v. 13, n. 2, p. 77-78, 1999.
- WHITE, J. W., OLSON, J. P. e VOLNOUT, S. I. On improving truck/shovel productivity in open pit mines. *CIM Bulletin*, v. 8(973), p. 43-49, 1993.