



SIMMIM: UMA FERRAMENTA PARA SIMULAÇÃO, OTIMIZAÇÃO E AUXÍLIO À TOMADA DE DECISÕES EM AMBIENTES DE MINAS A CÉU ABERTO

Rafael F. Alexandre^{1,2}, João Batista Mendes³, Felipe Campelo², João A. Vasconcelos²

¹ Universidade Federal de Ouro Preto, Departamento de Computação e Sistemas
Rua 37, no 115, Loanda
CEP: 35931-026 – João Monlevade, MG, Brasil

² Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Elétrica
Av. Antônio Carlos, 6627 – Pampulha
CEP: 31270-901 – Belo Horizonte, MG, Brasil

³ Universidade Estadual de Montes Claros, Departamento de Ciências Exatas
Campos Universitário Professor Darcy Ribeiro
CEP: 39401-089 – Montes Claros, MG, Brasil

rfalexandre@decea.ufop.br, jbmoc@yahoo.com.br, fcampelo@ufmg.br,
jvasconcelos@ufmg.br

RESUMO

Este trabalho apresenta um ambiente para simulação da operação em minas a céu aberto. A ferramenta desenvolvida permite a criação de cenários, simulação e uso de algoritmos especialistas para solução de problemas de otimização mono ou multiobjetivo. As soluções geradas por estes algoritmos são avaliadas pelo simulador e um conjunto de informações para os tomadores de decisões é construído. O teor das características químicas, tempo de fila, distância percorrida pelos equipamentos de transporte entre outras variáveis podem ser analisados a partir do resultado da simulação. O modelo matemático utilizado para as simulações realizadas é apresentado. Alguns resultados gerados pela ferramenta são avaliados e discutidos.

PALAVRAS CHAVE. Simulação, Otimização, Mina a Céu Aberto, Despacho.

Área principal (Simulação, Otimização Combinatória, Logística e Transportes)

ABSTRACT

This paper presents a computational environment for the simulation of operation in open pit mines. This tool allows the creation of scenarios, simulation and use of single and multiobjective optimization algorithms. The solutions generated by these algorithms are evaluated and used for building an information set for decision makers. The mathematical model used for the simulations is presented and some results generated by the proposed tool are evaluated and discussed.

KEYWORDS. Simulation. Optimization. Open Pit Mine, Dispatch.

Main area (Simulation, Combinatorial Optimization, Logistics and Transport)

1. Introdução

O desenvolvimento do setor de mineração é essencial para sustentar o crescimento econômico dos países produtores. O aproveitamento eficiente dos recursos minerais exige investimentos significativos em aplicações inteligentes, capazes de fornecer soluções para o uso mais eficiente de seus recursos. Em uma mineradora, o setor responsável pela operação da mina possui um custo operacional muito elevado devido ao transporte do material, que está localizado em uma frente de lavra, até o seu destino, normalmente um britador ou pilhas de estoque. Segundo Ercelebi e Bascetin (2009) cerca de 50% do custo de operação da mina está relacionado a este transporte de material. Com a elevada complexidade das atividades na mineração e o alto custo de investimentos em equipamentos, a definição da melhor forma de se utilizar os recursos disponíveis deve ser tomada com base em critérios científicos bem definidos. Neste contexto, adota-se a o uso de simuladores que visam fornecer ferramentas para dar suporte à tomada de decisão.

Segundo Gottfried (1984), a simulação é uma tarefa que permite inferir a respeito do comportamento de um sistema, utilizando de um modelo correspondente, cujas relações de causas e efeitos são as mesmas que ocorrem no sistema em estudo.

É possível estudar um sistema por meio de um modelo matemático onde pode-se resolvê-lo analiticamente, conforme considerações e restrições definidas, ou por meio de uma solução por simulação. Entretanto, segundo LAW (2007), sabe-se que a maioria dos modelos que representam os sistemas reais possuem alto grau de complexidade, o que dificulta ou impossibilita sua resolução analítica.. Chwif (2007) afirma que quanto mais complexo, dinâmico e aleatório for um problema, maior será a aplicabilidade das ferramentas de Simulação.

Com base no exposto acima, o presente trabalho apresenta uma proposta de implementação de um sistema computacional voltado para a simulação de um ambiente de operação de mina a céu aberto que trabalha com os principais componentes da operação. A criação deste ambiente de simulação é justificada devido à necessidade de reprodução das mesmas condições para possibilitar a comparação de algoritmos de otimização, essencial para a avaliação da eficiência relativa de diferentes abordagens.

O trabalho está organizado da seguinte forma: o capítulo 2 descreve os aspectos mais relevantes da operação de uma mina e que são essenciais para o entendimento deste trabalho. O capítulo 3 apresenta o sistema computacional construído e suas principais características. O capítulo 4 define o modelo matemático utilizado para as simulações apresentadas neste trabalho. O capítulo 5 define o cenário de mina utilizado pelo simulador desenvolvido. Além disso, resultados de simulações são apresentados e discutidos. Por fim, as conclusões e propostas de trabalhos futuros são expostos no capítulo 6.

2. Operação em Minas a Céu Aberto

Diferentes tipos de problemas de despacho existem em operações de mineração. Por exemplo, o problema de roteamento de veículos (PRV) trata de alocar veículos para concluir os trabalhos em tempo um tempo pré-definido, respeitando as suas capacidades conforme apresentado por Yang et al. (2004). Outro problema consiste em determinar um número adequado de veículos para a realização de um trabalho conforme Ta (2002). Em ambos os casos, tem-se um problema de otimização restrita devido ao ambiente no qual os equipamentos estão inseridos. Outros autores como Souza et al. (2010) abordam o problema de alocação de máquinas de cargas procurando posicioná-las de forma a garantir a qualidade do minério a ser produzido ou mesmo maximizar a produção na mina, também definindo o número de viagens que cada um dos caminhões deve realizar para cada frente de lavra. Conforme os trabalhos de Alarie e Gamache (2002) e Subtil, Silva e Alves (2011) o problema de despacho de caminhões em mina a céu aberto procura responder a seguinte questão: para qual local este caminhão deve ser enviado em um

determinado instante?". Algoritmos especialistas em realizar o despacho destes caminhões devem decidir qual é este local visando atender aos requisitos de produção.

Segundo Bastos (2010) e Kolonja et al. (1993) operação da mina é composta pelo posicionamento das máquinas escavadeiras/carregadeiras nas frentes de lavra. O número de frentes de lavra varia de acordo com o plano de desenvolvimento da mina. Outro ponto importante está associado com o dimensionamento da frota de equipamentos de transporte e à qualidade esperada do minério. A operação consiste em escavar e transportar o material (minério ou estéril) de uma determinada frente de lavra até o seu destino (pilha de estéril ou britador).

3. Descrição do Ambiente de Simulação

A ferramenta computacional desenvolvida é baseada em eventos discretos ocasionados pela mudança de estados dos equipamentos de transporte (caminhões) que se encontram em operação em um determinado instante de tempo na mina. Segundo Ramadge e Wonham (1989) um sistema baseado em eventos discretos é um sistema dinâmico que evolui com a ocorrência de eventos físicos que ocorrem, em geral, com intervalos de tempo irregulares e desconhecidos. A ocorrência de um evento causa, normalmente, uma mudança interna no sistema. Esta mudança é causada pela conclusão de uma atividade agendada ou pelo fim de uma temporização.

Segundo Kelton et AL. (1998) uma ferramenta de simulação pode se classificada como determinística ou estocástica. Quando se trata de uma ferramenta determinística, as variáveis envolvidas no problema não possuem incertezas. As ferramentas estocásticas podem conter variáveis aleatórias com distribuições de probabilidade. Estas variáveis têm como objetivo reproduzir o ambiente da forma mais realista possível. No contexto do ambiente de mina a céu aberto, variáveis como a velocidade do caminhão, massa transportada ou mesmo a probabilidade de quebra de um equipamento de transporte podem ser modeladas como variáveis estocásticas embora neste trabalho, considerarmos tais variáveis como sendo determinísticas para efeitos de comparação.

Um aspecto positivo do simulador para despacho em minas a céu aberto é que ele pode reproduzir o comportamento da mina quando executa o plano de despachos dos veículos, processando eventos baseados em dados da mina, conforme pode ser visto no trabalho de Fioroni et al. (2008).

A ferramenta proposta modela os principais componentes de uma mina como as frentes de lavra, equipamentos de carga, equipamentos de transporte, teores de qualidade dos produtos presentes nas frentes de lavra bem como o esperado nas usinas de beneficiamento. Locais de carga e descarga de materiais e rotas existentes entre estes locais também são considerados.

Os equipamentos de carga, também conhecidos como pás carregadeiras, são responsáveis pelo carregamento dos caminhões. As carregadeiras definidas possuem como propriedades a sua produtividade mínima e máxima, fornecida em toneladas por hora e o seu porte, que indica a compatibilidade com os caminhões. Ou seja, as pás carregadeiras de porte p só podem realizar o carregamento de caminhões de porte p .

Os caminhões devem ter sua *velocidade* operando vazio e operando carregado definidas. Dessa forma, é possível construir um cenário onde os caminhões que estão trafegando vazios têm uma velocidade superior aos que estão operando carregados. Além disso devem ser definidos a *capacidade de transporte*, ou seja, quantas toneladas de minério cada caminhão é capaz de transportar, e também o seu *porte* que nada mais é que a compatibilidade com as pás carregadeiras.

A ferramenta possui um conceito de local que pode ser: i) frente de lavra; ii) britador; iii) pilha de estéril. Para que possamos definir uma frente de lavra é necessário que sejam alocadas a essa frente ao menos uma máquina de carga já definida. Adicionalmente, o tipo de material (minério ou estéril) que está sendo retirado também é definido. Caso o tipo de material seja minério, os

elementos químicos de interesse juntamente com os seus teores mínimo e máximo são definidos. Para os locais chamados de britadores é necessário definir os teores mínimo, esperado e máximo dos elementos químicos que desejamos avaliar.

A relação entre os locais construídos são realizados através do que chamamos de rotas de transporte. Sendo assim, para cada rota criada, dois locais na mina são atribuídos indicando a distância entre eles. Normalmente a rota faz a associação entre uma frente de lavra e um britador ou mesmo uma pilha de estéril. Ou seja, a rota liga um local onde está sendo lavrado um material para um possível local para onde ele deve ser transportado.

Durante o seu processamento, o simulador proposto associa a cada veículo em operação um conjunto de variáveis. A administração destas variáveis permite a alocação e/ou liberação dos diversos equipamentos, inclusão de veículos na fila de carregamento e basculamento, concluir ou iniciar um novo despacho. Ao chegar a uma frente de lavra para realizar uma operação de carregamento, caso o equipamento de carga já esteja em operação (carregando um caminhão), o veículo é incluído numa fila para posterior carregamento. As principais variáveis associadas a cada veículo estão identificadas na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros associados a cada veículo para simulação de um conjunto de despachos

Parâmetro	Descrição do Parâmetro
Tempo de Deslocamento Vazio (T_{dv}) e Carregado (T_{dc})	T_{dv} e T_{dc} correspondem, respectivamente, ao tempo de deslocamento vazio e carregado de cada veículo. Estes tempos são calculados com base na distância entre os locais de carga e descarga e na velocidade ¹ dos caminhões;
Tempo para Carga de Material (T_c)	Tempo para carregamento de um veículo. Varia segundo a capacidade do caminhão e a produtividade do equipamento de carga;
Tempo de Basculamento (T_b)	Tempo para descarga do material em um britador ou pilha de estéril;
Tempo de fila para carregamento (T_{fc}) e Basculamento (T_{fb})	Registra o tempo que o veículo permanece parado num ponto de carga (T_{fc}) ou de basculamento (T_{fb}), antes de iniciar a operação de carga ou descarga de material. Ambos são calculados pelo simulador;

O simulador funciona segundo a ocorrência de um conjunto de eventos que alteram a configuração dos equipamentos que operam na mina. Esses eventos são descritos a seguir:

Início de um despacho: Quando se aloca um caminhão a um despacho, determina-se o horário (h:m:s) de chegada do veículo ao local de carregamento. Esta informação é incluída na pilha de simulação;

¹ Valores definidos na criação do cenário.

Início da operação de carregamento: Quando um veículo qualquer chega ao local de carregamento, o registro de início de despacho, incluído na pilha no passo anterior, é removido da estrutura. Se existe equipamento de carga disponível na frente de lavra inicia-se a operação de carregamento do veículo. Nesse caso, determina-se o horário (h:m:s) de conclusão do carregamento que é incluído na pilha de simulação. Caso o equipamento de carga esteja alocado em outro despacho, o veículo entra na fila para posterior carregamento;

Conclusão da operação de carregamento: Primeiramente o registro de carregamento incluído na etapa anterior é removido da pilha de simulação. Em seguida, o equipamento de carga utilizado é liberado para novos carregamentos. Quanto ao veículo carregado, determina-se o horário (h:m:s) de chegada ao local de basculamento que é adicionado à pilha de simulação;

Chegada ao local de basculamento: Ao chegar ao ponto de basculamento, remove-se da pilha o registro de chegada do veículo ao local de basculamento. Se o veículo foi destinado a um local onde opera um britador que está realizando outro basculamento, o veículo é adicionado à fila de basculamento. Caso contrário, determina-se o horário de conclusão do basculamento do veículo que é adicionado à pilha de execução;

Conclusão do basculamento: Após a conclusão do basculamento, retira-se da pilha a informação registrada anteriormente. Em seguida o veículo é liberado para realizar novos despachos. Se o basculamento utilizou um britador, o equipamento também liberado para novas operações.

Seja H_{id} o instante (h:m:s) em que um despacho foi iniciado (um veículo foi alocado ao despacho). O tempo de ciclo pode ser definido conforme ilustrado na Figura 1, onde:

- ✓ Horário de chegada à frente de lavra (H_{cf}): $H_{cf} = H_{id} + T_{dv}$;
- ✓ Horário de início da operação de carregamento (H_{ic}): $H_{ic} = H_{cf} + T_{fc}$;
- ✓ Horário de conclusão do despacho (H_{pf}): $H_{pf} = H_{ic} + T_c$;
- ✓ Horário de chegada ao local de basculamento (H_{cb}): $H_{cb} = H_{pf} + T_{dc}$;
- ✓ Horário de início do basculamento (H_{ib}): $H_{ib} = H_{cb} + T_{fb}$;
- ✓ Horário de termino do basculamento (H_{tb}): $H_{tb} = H_{ib} + T_b$.

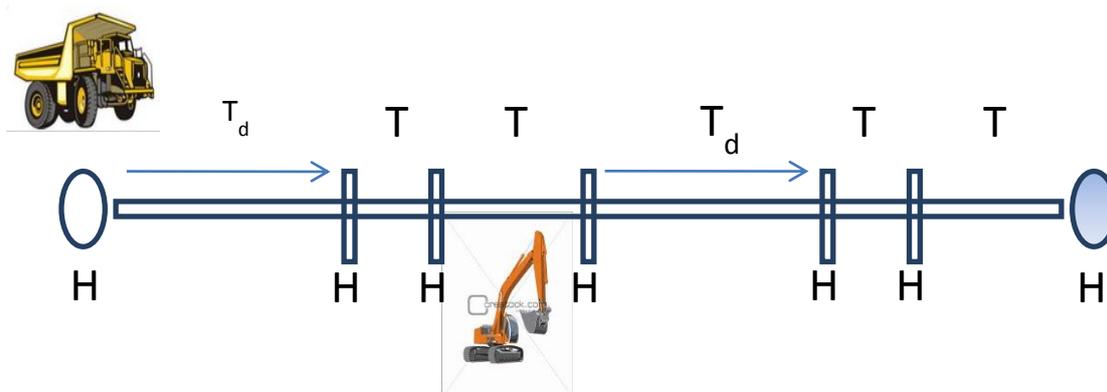


Figura 1. Tempo de ciclo de um despacho numa mina a céu aberto.

O diagrama apresentado na Figura 2 define a sequência de eventos executada durante a atividade de um equipamento de transporte na mina.

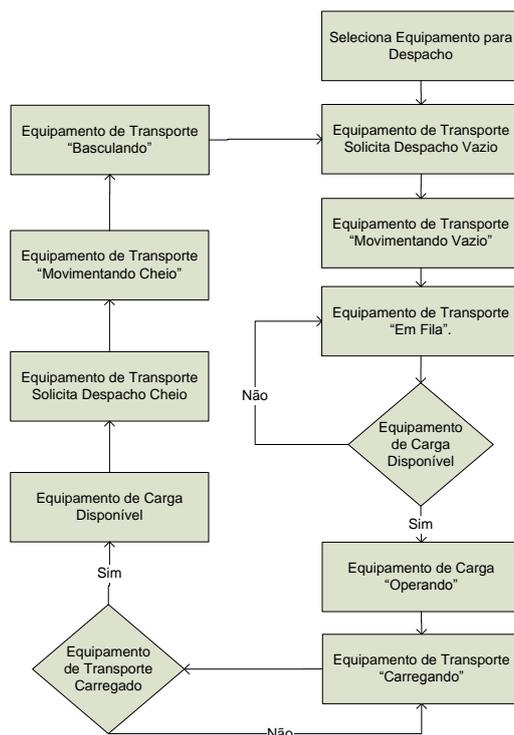


Figura 2. Diagrama de eventos do simulador.

Para facilitar a identificação do próximo evento a ser executado, os eventos são mantidos em fila de prioridades, onde esta prioridade é o horário de execução do próximo evento. O evento que se encontra no início da fila será o próximo a ser executado pelo simulador, sendo removido da fila e processado. Calcula-se o horário previsto para a próxima ocorrência de evento para o equipamento em questão, altera-se o seu estado e insere-se na fila de prioridade um novo evento previsto para o horário calculado. Observe que nem toda a mudança de estado de um determinado equipamento necessita de um novo despacho. Um despacho só será necessário quando o próximo evento é: i) Movimento Vazio ou ii) Movimento Cheio. Nestes casos, o próximo despacho é solicitado através de uma interface de comunicação com algoritmos especialistas para resolver o problema. A linha 2 da Tabela 2, ilustra esta situação, quando às 12:25 (H) termina o basculamento do caminhão no britador (ponto 1) e ele recebe nova ordem de despacho indicando que ele deve ir para a frente de lavra 2 (ponto 2) para ser carregado com nova carga de minério.

Tabela 2. Estrutura matricial para controle de eventos.

Hora do Evt.	1º evento			2º evento			3º evento			...
	Rota	Estado	PrevHora	Rota	Estado	PrevHora	Rota	Estado	PrevHora	...
1	1↔3	MV	12:37	1↔3	MV	12:37	1↔3	MV	12:37	...
2	3↔1	MC	12:23	3↔1	BA	12:25	1↔2	MV	12:45	...
3	1↔2	MV	12:26	1↔2	MV	12:26	1↔2	MV	12:26	...

Legenda: BA → Basculamento; CA → Carregamento; MC → Movimento cheio; MV → Movimento vazio

A Figura 3 mostra como o simulador foi modularizado. Primeiramente, percebe-se que é possível criar diversos cenários de mina onde cada um deles possui particularidades. Os

despachos dos equipamentos definidos para cada cenário são criados por algoritmos especialistas para esta tarefa e submetidos ao simulador. Cada um destes algoritmos possui estratégias distintas onde podemos comparar e definir qual destas estratégias de despacho possui melhor desempenho.

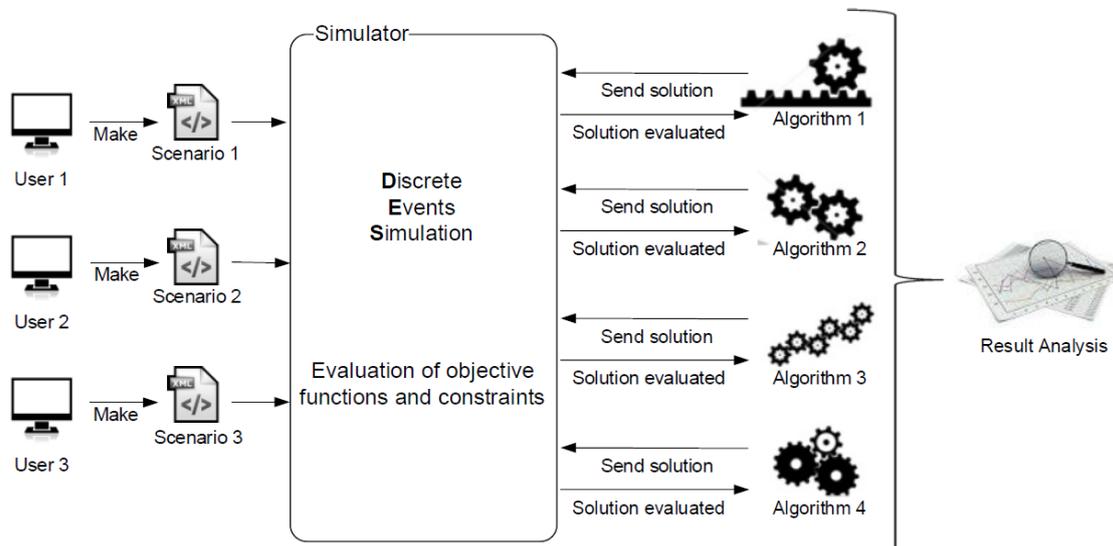


Figura 3. Arquitetura do simulador construído.

Quando uma simulação é iniciada na plataforma, os dados do cenário a ser simulado são carregados pelo módulo de simulação ao qual um algoritmo de despacho está acoplado. Os resultados obtidos são gerados pelo módulo de simulação para uma possível análise estatística destes dados. O objetivo principal é analisar os resultados de variáveis como massa produzida, distância percorrida pelos equipamentos de transporte, ocorrência de filas, qualidade do produto produzido e produtividade das máquinas de carga.

Normalmente, um algoritmo de otimização gera uma cadeia de despachos que é enviada para simulação. Após o processamento da sequência de despachos realizado pelo simulador e com base nos resultados da simulação, os algoritmos especialistas podem construir novas soluções objetivando melhorar os resultados obtidos previamente ou interromper sua operação baseado em algum critério de parada.

4. Modelo matemático proposto

O módulo de simulação da ferramenta desenvolvida foi construído baseado em um modelo matemático multiobjetivo desenvolvido para contemplar os principais objetivos relacionados ao problema de despacho em minas a céu aberto e também suas principais restrições. A ferramenta é flexível e permite que o usuário defina quais serão os objetivos que o módulo de otimização deve trabalhar assim como as restrições.

Neste trabalho, foi considerado um modelo que contempla dois objetivos conflitantes. O primeiro deles visa minimizar o número de caminhões em operação na mina. Isso permite um menor custo de transporte ou mesmo a manutenção preventiva da frota. O segundo objetivo procura maximizar a produção (minério e estéril) na mina. Os objetivos são definidos pelo modelo apresentado abaixo:

$$\max \sum_{r \in R} x_r(\bar{v}_a, \tilde{M}) + \sum_{w \in W} x_w(\bar{v}_a, \tilde{M}) \quad (1)$$

$$\min \sum_{t \in T} \bar{v}_t * cap_t \quad (2)$$

- ✓ R : Conjunto de frentes de lavra de ROM.
- ✓ x_r : Produção de ROM para a m -ésima frente de lavra (t).
- ✓ W : Conjunto de frentes de lavra de estéril.
- ✓ x_w : Produção de estéril para a e -ésima frente de lavra (t).
- ✓ \bar{v}_a : Variável de otimização que indica a frota de equipamentos de transporte ativos (em operação).
- ✓ \tilde{M} : Variável de otimização que define a sequencia de despachos que serão executados.
- ✓ T : Conjunto de equipamentos de transporte disponíveis.
- ✓ cap_t : Capacidade de carga útil do equipamento de transporte.
- ✓ \bar{v}_t : Variável de otimização que define se o equipamento de transporte t está disponível para operação ($t = 1$) ou não ($t = 0$).

Além dos objetivos já apresentados, a ferramenta ainda contempla um completo conjunto das principais restrições dos modelos matemáticos discutidos na literatura especializada. Estas restrições são apresentadas no modelo matemático de Mendes (2013).

5. Resultados e discussões

Como descrito no capítulo 3, o simulador permite a criação de cenários hipotéticos de minas a céu aberto, onde diversas análises relativas ao comportamento de um conjunto de frentes de lavra, usinas de beneficiamento, equipamentos de carga, pilhas de estéril e principalmente dos equipamentos de transporte são passíveis de serem feitas.

Neste contexto, esta ferramenta foi utilizada para a criação de cenários baseados nas instâncias utilizadas no trabalho de Souza et al. (2010). Entretanto, os cenários utilizados como base não contemplam todas as variáveis utilizadas pelo simulador proposto neste trabalho, como exemplo, a distância entre frentes de lavra e britadores ou pilhas de estéril. Sendo assim, para estas variáveis, foram adotados valores próximos aos de minas reais. Os detalhes dos cenários criados podem ser obtidos nos arquivos disponíveis em Alexandre et al. (2014). Por restrição de espaço, este trabalho apresentará apenas alguns resultados obtidos em simulações de um dos cenários disponíveis (instância 1).

Para efeitos de otimização foi considerado um algoritmo genético multiobjetivo conhecido como NSGAIII proposto por Deb et al. (2002). A escolha deste método se deve por ser um dos mais populares da literatura e por apresentar bons resultados quando comparados com outras abordagens. Foi desenvolvida uma representação especialista para o problema, capaz de gerar soluções factíveis que, por sua vez, são interpretadas pelo simulador proposto. O objetivo é que o algoritmo encontre um conjunto de soluções ótimas para o problema ou que estas soluções sejam as mais próximas do conjunto ótimo, também conhecidas como conjunto Pareto ótimo.

Foram executadas 33 rodadas de cada algoritmo em cada cenário de mina, em ordem completamente aleatorizada. Todos os algoritmos foram implementados em linguagem Java (JDK 1.6). O experimento foi realizado em um computador Intel Core i7, 2.2 GHz, com 8 GB de RAM e sistema operacional Windows 8.1. Os parâmetros utilizados para gerar os resultados deste trabalho são definidos pela Tabela 3. O critério de parada utilizado para o algoritmo de otimização foi o número máximo de soluções-candidatas avaliadas. O tempo de simulação definido refere-se ao tempo real de operação de uma mina, ou seja, os resultados apresentados são relativos a uma hora de operação da mina.

Tabela 3. Parâmetros utilizados na simulação.

Parâmetro	Valor
Probabilidade de Cruzamento	0,9
Probabilidade de Mutação	0,2
Tamanho da População	200
Número de Avaliações das Funções Objetivo	20.000
Tempo de Simulação	60'

A Figura 4 ilustra os resultados obtidos pelo algoritmo NSGAI. Os círculos vazios em vermelho representam uma estimativa obtida de soluções Pareto-ótimas para a instância de teste. Os círculos preenchidos de azul referem-se à população inicial de uma execução aleatoriamente selecionada do algoritmo, e os asteriscos pretos em preto apresentam a fronteira encontrada pelo algoritmo em questão a partir dos pontos iniciais azuis. Percebe-se que as soluções encontradas pelo algoritmo estão presentes na fronteira Pareto estimada ou estão muito próximas, o que sugere que o método seja capaz de gerar soluções adequadas para o problema.

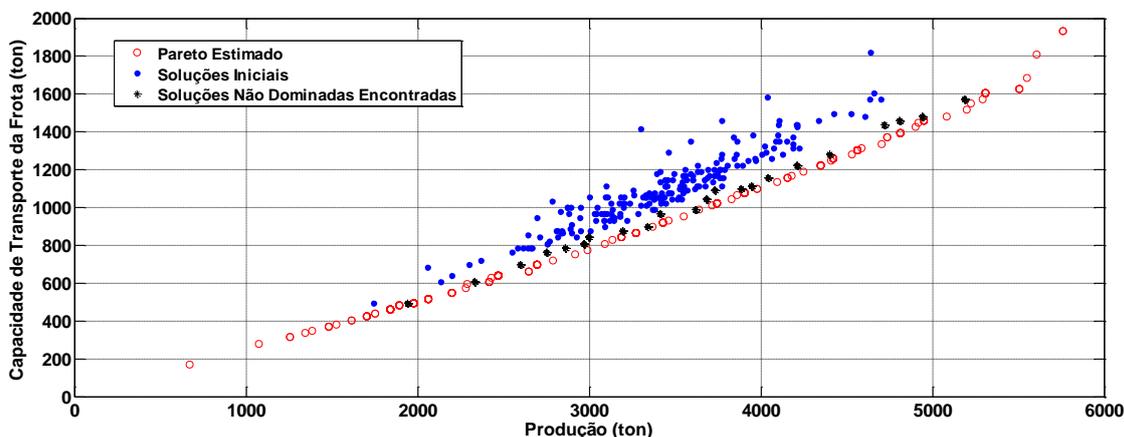


Figura 4. Resultados obtidos com o NSGAI para a instância de teste. As soluções iniciais e as não-dominadas encontradas referem-se a uma execução aleatória de 33 rodadas do algoritmo.

Para auxiliar na tomada de decisão, a ferramenta permite que o usuário visualize os indicadores dos equipamentos em operação. Para fins de ilustração, uma solução presente na fronteira retornada em uma das execuções do algoritmo foi escolhida de forma aleatória para análise de alguns destes indicadores.

A Figura 5 apresenta, para cada uma das máquinas de carga em operação, o tempo em que elas estiveram operando, ou seja, carregando um caminhão, e o tempo em que estiveram ociosas. O ideal é que todas as máquinas estivessem operando durante todo o tempo. Logo, o gráfico indica que pode ser interessante incluir mais caminhões na operação para que o tempo ocioso das máquinas seja reduzido. Outra possibilidade seria retirar alguma máquina de operação possibilitando, por exemplo, a manutenção da mesma.

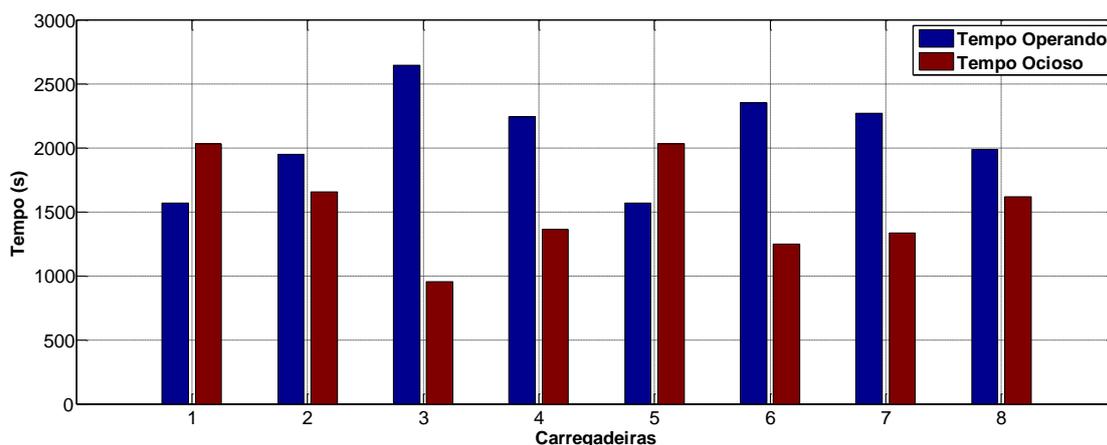


Figura 5. Tempo de operação das máquinas de carga de uma solução escolhida de forma aleatória e presente na fronteira Pareto de uma execução do algoritmo NSGAI.

Sendo a qualidade do minério produzido uma das principais variáveis deste problema, o comportamento do teor médio de um dos elementos químicos definidos para o cenário de teste é apresentado. A Figura 6 apresenta os valores do teor da característica de qualidade *Par1* do cenário de teste. O cálculo do Teor Médio é obtido pela equação (6.1) apresentada abaixo.

$$\sum_{e=1}^{|E|} t_{eq} * qtde_e \quad \forall (e \in E) \wedge (q \in Q) \quad (2.1)$$

- ✓ *E*: Conjunto de eventos ocorridos durante a simulação.
- ✓ *Q*: Conjunto de elementos químicos do ROM.
- ✓ t_{eq} : Teor produzido no evento *e* relativo a um elemento químico *q*.
- ✓ $qtde_e$: Massa produzida no evento *e* da simulação.

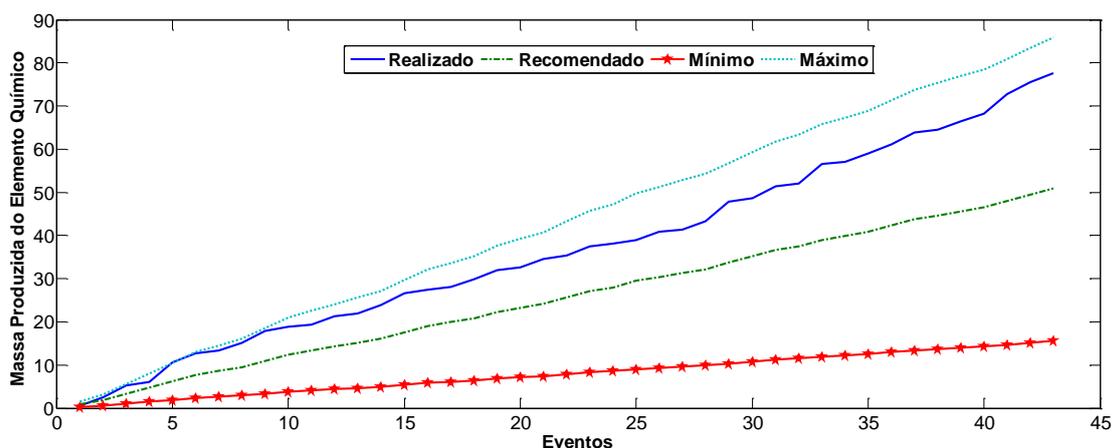


Figura 6. Massa acumulada produzida do elemento químico *Par1*. Os dados referem-se a uma solução escolhida de forma aleatória presente na fronteira Pareto encontrada pelo Algoritmo NSGAI.

6. Conclusões

Este trabalho apresentou a ferramenta desenvolvida para simulação de um ambiente de minas a céu aberto. Foram apresentados também os principais componentes (caminhões, pás carregadeiras, frentes de lavra, britadores, entre outros) envolvidos na simulação, bem como alguns exemplos de resultados gerados. Além de permitir a avaliação de possíveis soluções através de um ambiente de simulação, a ferramenta possibilita que tomadores de decisões avaliem qual seria a produtividade dos equipamentos presentes na mina caso uma nova pá carregadeira ou um novo caminhão fossem adquiridos. Adicionalmente, a ferramenta permite o acoplamento de algoritmos especialistas de despacho de caminhões em minas a céu aberto para a busca por soluções ótimas para o problema, tornando o uso dos recursos em operação na mina mais eficientes.

A avaliação dos equipamentos em operação pode ser realizada através de gráficos gerados, permitindo aos tomadores de decisões avaliar alternativas de soluções de forma trivial. A avaliação da qualidade do minério produzido pode ser acompanhada através de gráficos que fazem o controle dessa qualidade a cada ocorrência de evento.

Como trabalho futuro, pretende-se estudar e comparar diferentes estratégias e algoritmos de otimização especialistas para solução do problema de despacho em minas a céu aberto. Adicionalmente é importante dimensionar o espaço de busca do problema além de estudar qual o conjunto de objetivos é mais interessante para se trabalhar uma vez que, a ferramenta permite trabalhar com um conjunto arbitrário de objetivos, que são parametrizados antes do início das simulações.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao suporte concedido pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela Fundação de Amparo à Pesquisa do estado de Minas Gerais (Fapemig), e pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Referências

- Alarie, S. e Gamache, M.** (2002). Overview of solution strategies used in truck dispatching systems for open pit mines, *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 16:59-76.
- Alexandre, R. F., Vasconcelos J. e Campelo, F.** (2014) Additional electronic files for the manuscript: "Solving Multiobjective Open-Pit Mining Operational Planning Problems by Using Evolutionary Algorithms". <http://cpdee.ufmg.br/~fcampelo/files/MOPMOPP/>.
- Bastos, G. S.** (2010). Methods for Truck Dispatching in Open-pit Mining, PhD Thesis, Aeronautics Institute of Technology, Brazil.
- Caterpillar.** (2012). Cat products. Retrieved 7 9, 2012, from Cat Products & Services: Online: <http://www.cat.com/equipment/articulated-trucks>
- Chwif, L. e Medina, A.C.** (2007). Modelagem e Simulação de Eventos Discretos, Teoria & Aplicações, 2ªed. São Paulo, Bravarte.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. e Meyarivan, T.** (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: Nsga-ii, *Evolutionary Computation, IEEE* 6(2) 182-187.
- Ercelebi, S. G. e Bascetin, A.** (2009). Optimization of shovel-truck system for surface mining, *Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 109:433-439.
- Fioroni, M., Franzese, L., Bianchi, T., Ezawa, L., Pinto, L. e Jr., G.** (2008). Concurrent simulation and optimization models for mining planning. *Simulation Conference*, 759 -767.
- Gottfried, B. S.** (1984). Elements of Stochastic Process Simulation. New Jersey, Prentice-Hall.

- Kelton, W. D., Sadowski, R. P. e Sadowsky, D. A.** (1998). Simulation with Arena. Mc Graw Hill, New York.
- Kolonja, B., Kalasky, D. R. e Mutmanský, J. M.** (1993). Optimization of Dispatching Criteria for Open-Pit Truck Haulage System Design Using Multiple Comparisons with the Best and Common Random Numbers. Simulation Conference Proceedings. Winter , vol., no., pp.393-401, 12-15.
- Law, A. M.** (2007). Simulation Modeling & Analysis. 4^o ed. International Edition, New York, McGraw-Hill.
- Mendes, J. B.** (2013). Uma Abordagem Multiobjetivo para o Problema de Despacho de Caminhões em Minas a Céu Aberto. Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Dissertação de Mestrado - Engenharia Eletrica. Belo Horizonte - MG: Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica.
- Ramadge, P. J. G. e Wonham, W. M.** (1989). Control of discrete event systems. Proceedings of the IEEE, 77(1), 81-98.
- Souza, M. J. F., Coelho, I. M., Ribas, S., Santos, H. G. e Merschmann, L. H. C.** (2010). A hybrid heuristic algorithm for the open-pit-mining operational planning problem. European Journal of Operational Research. v.207, n.2, p.1041 – 1051.
- Subtil, R. F., Silva, D. M. e Alves, J. C.** (2011). A Practical Approach to Truck Dispatch for Open Pit Mines. In: 35th International Symposium on Application of Computers in the Minerals Industry (APCOM), Wollongong. Proc. 35th International Symposium on Application of Computers in the Minerals Industry (35th APCOM), 2011. p. 765-777.
- Ta C. H.** (2002). Optimal haul truck allocation in the Syncrude mine. Master's thesis, University of Alberta, Department of Electrical and Computer Engineering, Edmonton.
- Yang J., Jaillet P. e Mahmassani H. (2004). Real-time multivehicle truckload pickup and delivery problems. Transport Sci 38(2):135-148.