

**Planejamento operacional de minas a céu aberto: aplicação de otimização baseada em simulação****Operational planning of open pit mines: simulation-based optimization application**

DOI:10.34117/bjdv6n9-518

Recebimento dos originais: 08/08/2020

Aceitação para publicação: 22/09/2020

**Vinícius Gonçalves de Souza**

Graduando em Engenharia de Produção

Universidade Federal de Goiás – Regional Catalão

Endereço: Av. Dr. Lamartine Pinto de Avelar, 1120 Setor Universitário, Catalão - GO - CEP:  
75704-020

E-mail: vinicius233@gmail.com

**Brener Gonçalves Vaz**

Engenheiro de Produção

Universidade Federal de Goiás – Regional Catalão

Endereço: Av. Dr. Lamartine Pinto de Avelar, 1120 Setor Universitário, Catalão - GO - CEP:  
75704-020

E-mail: brenevaz@gmail.com

**Stella Jacyszyn Bachega**

Doutora em Engenharia de Produção

Universidade Federal de Goiás – Regional Catalão

Endereço: Av. Dr. Lamartine Pinto de Avelar, 1120 Setor Universitário, Catalão - GO - CEP:  
75704-020

E-mail: stella@ufg.br

**Dalton Matsuo Tavares**

Doutor em Engenharia Mecânica

Universidade Federal de Goiás – Regional Catalão

Endereço: Av. Dr. Lamartine Pinto de Avelar, 1120 Setor Universitário, Catalão - GO - CEP:  
75704-020

E-mail: dalton\_tavares@ufg.br

**RESUMO**

O setor mineral apresenta um importante papel na economia nacional, além de ter representatividade no mercado externo. Técnicas como a otimização baseada em simulação pode ser aplicada em empresas deste setor para auxiliar no processo decisório e promover melhorias no processo. O objetivo deste artigo é aplicar a otimização baseada em simulação em cenário elaborado para o planejamento operacional de mina a céu aberto. Para tanto, foram utilizados a explicação científica hipotético-dedutiva, a abordagem de pesquisa quantitativa e o procedimento experimental, devido ao uso de simulação computacional. Os cenários de otimização baseados em simulação objetivaram minimizar o tempo médio do minério no sistema e a maximização da produção. Verificou-se que há

um trade-off entre os ganhos com a redução de número de caminhões em operação com o aumento do total da produção.

**Palavras-chave:** Simulação; Otimização; Planejamento Operacional; Mina a Céu Aberto.

### **ABSTRACT**

The mineral sector presents an important role in the national economy, besides being representative in the external market. Techniques such as optimization based on simulation can be applied in companies of this sector to help in the decision-making process and promote improvements in the process. The objective of this article is to apply the optimization based on simulation in a scenario elaborated for the operational planning of open pit mines. For this, the hypothetical-deductive scientific explanation, the quantitative research approach and the experimental procedure were used, due to the use of computational simulation. The optimization scenarios based on simulation aimed at minimizing the average time of the ore in the system and the maximization of production. It was verified that there is a trade-off among the gains with the reduction of the number of trucks in operation with the increase of the total production.

**Keywords** Simulation; Optimization; Operational Planning; Open Pit Mine.

## **1 INTRODUÇÃO**

A mineração tem um papel fundamental e estratégico na economia nacional, que segundo dados oficiais do Ministério de Minas e Energia, publicados no próprio portal em 2014, representava 4% do PIB nacional e 5% do PIB global, além de representar cerca de 23,5% das exportações brasileiras, com mais de 200 mil empregos gerados à época, apenas na área da extração mineral (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2014).

Segundo o Anuário Mineral Brasileiro para substâncias metálicas do ano de 2018, divulgado pela Agência Nacional de Mineração (2019), o Brasil é considerado um dos principais expoentes do mercado internacional. A participação do Brasil no comércio exterior, focando apenas na participação das substâncias metálicas, representa 80% do valor da produção mineral comercializada (AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO, 2019).

O país atua exportando principalmente bens primários e semimanufaturados, para diversos países, logo, se submete a um mercado cada vez mais competitivo, eficiente e modernizado, e atende a demandas cada vez maiores. Diante desta crescente busca por competitividade no mercado da mineração, diversas medidas foram tomadas pelas próprias empresas atuantes no mercado, além de medidas implementadas pelo governo federal para aumento da competitividade e atratividade no setor. Conforme FIESP (2017), além de aproveitar incentivos, cada empresa deve encontrar soluções para se tornar mais eficiente e competitiva no seu respectivo segmento de mercado.

Existem dois métodos de processamento de lavra em operação atualmente: a céu aberto e a subterrânea (CURI, 2017). Este trabalho se baseia especificamente no modelo de lavra a céu aberto,

que opera sobre um processo com altos custos de tempo e operação de múltiplas máquinas trafegando sobre enormes áreas, em uma rede que relaciona o processo desde a(s) frente(s) de lavra até o depósito de estéril ou de minério para ser beneficiado, onde são movimentadas toneladas de material diariamente.

Diante deste cenário, a busca pela eficiência se torna uma constante. Eliminar desperdícios de uso de recursos e finalmente otimizar o processo torna-se uma opção para se obter ganhos consistentes de eficiência e produtividade. Assim, a questão de pesquisa considerada é: “Como utilizar a otimização em conjunto com a simulação para melhoria do desempenho produtivo de uma mina a céu aberto?”.

A otimização vem sendo usada em conjunto com a simulação computacional para auxiliar a análise de sistemas produtivos. Autores como Antunes e Santos (2019), Lucena, Gorgônio e Bocanegra (2020) e Suzek e Bing (2020) defendem o uso de simulação para análise do desempenho de sistemas de produção e operações. O uso de modelos computacionais foi empregado na mineração com sucesso, com aplicação fundamentalmente no apoio a tomada de decisão baseada na previsão de resultados para problemas específicos, conforme constatado em (UPADHYAY; ASKARI-NASAB, 2018). Mambo (2017) também fez o uso de softwares de simulação no cenário de uma mina a céu aberto, atingindo resultados satisfatórios, apontando dentre muitas vantagens, a flexibilidade do método juntamente com a facilidade para se identificar possíveis gargalos no processo.

Assim, o objetivo geral desta pesquisa é aplicar a otimização baseada em simulação em um cenário elaborado e embasado em minas a céu aberto para o seu planejamento operacional. Esta pesquisa justifica-se pela importância do tema, visto que o uso da modelagem e simulação computacional se revela como uma técnica versátil e possível de ser aplicada em minas a céu aberto. Esta técnica possibilita a criação de um modelo virtual para uma situação de referência, a qual pode utilizar em conjunto a otimização de um cenário, considerando as possíveis variabilidades do sistema real. Além disso, há a possibilidade de realizar comparações convincentes por meio de indicadores de desempenho para cenários, antes e depois da otimização.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

Esta seção apresenta a fundamentação teórica sobre minas a céu aberto, planejamento operacional de minas a céu aberto e otimização baseada em simulação.

## 2.1 MINAS A CÉU ABERTO

Segundo Curi (2014, p. 17), uma mina pode ser entendida como a jazida em lavra, incluindo fatores de infraestrutura de apoio à produção, como por exemplo, edificações, o maquinário utilizado, operários e insumos em geral. Mina a céu aberto, que é o objeto escolhido para estudo e bastante comum no Brasil, de acordo com Curi (2014, p. 100), é um formato que se auto justifica em questões econômicas e tecnológicas em casos onde os depósitos minerais estão em camadas superficiais, e em alguns casos, com o avanço tecnológico, é possível atingir profundidades cada vez maiores.

Os métodos de lavra a céu aberto mais relevantes em utilização (com as correspondentes denominações em língua inglesa, internacionalmente consagradas) são aqueles de lavra a seco, ou seja, por bancadas (*open pit mining*), em tiras ou fatias (*strip mining ou open cast mining*) e por último, a lavra de pedreiras (*quarry mining ou dimensioned stones mining*) (CURI, 2017).

O modelo desenvolvido no estudo foi baseado especificamente no método de lavra por bancadas, que também é constantemente empregada na lavra de substâncias metálicas, como informa Curi (2017, p. 73).

## 2.2 PLANEJAMENTO OPERACIONAL DE MINAS A CÉU ABERTO

Planejar é conceber um futuro, e no caso específico de um projeto de lavra de uma mina a céu aberto, deve ser baseado em estudos confiáveis que garantam sua implementação com uma precisão adequada (CURI, 2017). De acordo com Curi (2014, p. 35), a fase de planejamento só pode ser iniciada após todos os estudos econômicos serem concluídos, para enfim, ser feito o dimensionamento da mina de acordo com a produção projetada para atender a demanda, para isso deve existir um bom projeto para definir e ajustar logística de transporte, buscando uma alocação que ofereça um *timing* adequado.

Em quase todas as empresas de mineração, em especial as de médio e grande porte, há a necessidade de se fazer um bom planejamento estratégico para a exploração do minério para se atender as demandas do mercado, pois isto se deve a limitação do ser humano ser incapaz de prever e analisar todos os cenários possíveis, e identificar as melhores opções em um tempo viável e compatível à realidade (ARAÚJO, 2008)

Destro (2015) aborda o uso de softwares de planejamento operacional de lavra, juntamente a simulação e despacho de caminhões, e define dois conceitos relevantes para a discussão do tema estudado. Assim, o autor se refere primeiramente ao método de alocação dinâmica por frente de lavra, que consiste basicamente na possibilidade de os caminhões no sistema operarem em diferentes

frente. Já o método de alocação estática por frente de lavra não tem esta característica, onde cada caminhão opera em uma frente específica. A relação destas definições com o ritmo da mina e o número de viagens feitas por cada caminhão define dois novos conceitos, o POLAD (Planejamento Operacional de Lavra com Alocação Dinâmica) e o POLAE (Planejamento Operacional de Lavra com Alocação Estática de caminhões). Para abordar estes conceitos, duas metodologias são frequentemente empregadas, a primeira é a aplicação da Programação Matemática (PM), a segunda, é definida pela implementação de Algoritmos Heurísticos e Metaheurísticos (HM).

### 2.3 OTIMIZAÇÃO BASEADA EM SIMULAÇÃO

A mineração vem sendo cada vez modernizada em todos os aspectos, seja no setor operacional, com máquinas cada vez mais modernas e eficientes, quanto no setor de planejamento, que vem fazendo o uso de diversas técnicas para auxiliar na eficácia dos estudos e melhorias. Para isso, a otimização baseada em simulação se destaca dentre outras opções por entregar resultados consistentes, com um baixo custo de tempo e recursos. Como afirma Mambo (2017), que pontuou a título de exemplo, as seguintes vantagens da aplicação da simulação:

- Facilidade na análise de sistemas complexos por parte dos tomadores de decisão sem interferir no sistema produtivo diretamente;
- A simulação permite prever resultados de novas estratégias que se desejam implementar dentro de sistemas produtivos de uma dada companhia;
- Auxilia na identificação de gargalos, visualiza-os a partir da animação e permite compreender sistemas complexos de forma integrada num computador digital, o que na realidade não seria possível;
- A simulação é bastante flexível, já que permite estudar e selecionar diferentes cenários para posterior implementação etc.

Dentro do cenário da mineração a simulação de operações e sistemas se mostrou uma ferramenta com importante valor estratégico para estudos de planejamento de produção, mudanças de *layouts*, reengenharia, ampliação, automatização e redução de custos. Como resultados, ela fornece dados e informações úteis para a tomada de decisão e com a grande vantagem de se fazer diversas alterações em modelos virtuais, sem o risco de atuar e cometer erros irreversíveis e com altos custos nos cenários reais (PEREIRA, 2016).

Mena et al. (2013) fizeram o uso da modelagem-otimização direcionada a alocação e distribuição de caminhões por rota de acordo com suas performances operacionais dentro de um

sistema caminhão-pá de uma mina a céu aberto à fim de buscar uma maximização da produtividade dos mesmos.

Ozdemir e Kumral (2019) fizeram o uso da otimização baseada em simulação aplicados a um sistema caminhão-escavadeira de uma mina a céu aberto, enfatizando o estudo na proposição e o teste de um modelo de despacho em duas etapas a fim de buscar a maximização da eficiência do sistema como um todo. Na primeira etapa, as frotas de caminhões e escavadeiras são divididas em subfrotas para trabalhar em uma lavra específica por meio da implementação de um método de otimização baseado em simulação que considera incertezas e a variação na operação de mineração. Na segunda etapa, os caminhões são simultaneamente despachados para as escavadeiras na lavra por meio de programação linear. O fator de correspondência também é rastreado no segundo estágio como uma medida da compatibilidade das frotas. No fim, foi notado que o modelo proposto e simulado apresentou um aumento em potencial de 9,4% na produção total de minério por turno.

Pantuza Junior (2011) abordou um problema de POLAD com o uso de otimização multiobjetivo com auxílio de simulação para a análise do comportamento do sistema com o uso do software ARENA<sup>®</sup>, versão 13, com o objetivo de minimizar os desvios de produção e qualidade do minério, além de minimizar o número de caminhões dentro do sistema, por isso, o problema foi tratado como otimização multi-objetivo.

Upadhyay e Askari-Nasab (2018) utilizaram a otimização baseada em simulação abordada para o planejamento operacional de curto prazo, baseada em uma ferramenta inteligente de auxílio na tomada de decisão operacional chamada *Mine Operational Optimization Tool* (MOOT), que tem como objetivo principal a otimização das operações da mina durante um número fixo de períodos, a fim de maximizar a produção e a qualidade através da alocação de caminhões e escavadeiras.

Coelho et al. (2014) propuseram a validação de um modelo de otimização para o planejamento operacional de curto prazo aplicados a uma mina a céu aberto, enfatizando a análise de congestionamento do sistema produtivo, onde foi optado um modelo de otimização simplificado, onde as frotas por lavra são homogêneas, e existe apenas um ponto de descarga de material, no caso, um britador, para o depósito de minério, além de um depósito para o estéril. O modelo de simulação foi desenvolvido com a versão educacional do Flexsim<sup>®</sup>. Os dados que foram usados como parâmetros do modelo foram baseados em dados de uma mina localizada no Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais.

**3 METODOLOGIA**

A explicação científica empregada neste trabalho de pesquisa foi a hipotético-dedutiva (Carvalho, 2000). Andrade (1998) afirma que nos modelos de simulação há a necessidade de se ter hipóteses como entradas, para assim, proceder com o processo decisório. Portanto, para conduzir os cenários desenvolvidos durante a pesquisa, foram desenvolvidas proposições a serem corroboradas ou refutadas.

No que tange a abordagem de pesquisa, foi empregada a abordagem quantitativa. Conforme Bryman (1989), dentre as preocupações desta abordagem, estão a necessidade de se mensurar o resultado de conceitos usados no desenvolvimento das hipóteses, os quais precisam ser testados e a demonstração de causalidade. Assim, a abordagem quantitativa foi utilizada pelas características dos dados a serem usados, tratados e posteriormente analisados.

O procedimento de pesquisa experimental foi utilizado, o qual permitiu a coleta de informações, segundo as quais os resultados sofreram influência do pesquisador, mediante intervenções (Miguel e Ho, 2012). Bryman (1989) enfatiza que este método de pesquisa é mais indicado para abordagens quantitativas e que também pode ser aplicado em modelagens matemáticas e simulações computacionais.

O modelo de simulação foi elaborado no simulador ProModel<sup>®</sup> e otimizado no SimRunner<sup>®</sup>, ferramenta de otimização integrada ao software de simulação. Para a condução da pesquisa, foram adotadas as etapas descritas a seguir, as quais seguem instruções de Law e Kelton (2000) e Harrell et al. (2011).

- Etapa 1 – formulação do problema e planejamento do estudo: primeiramente foi feita a identificação de entidades, locais, definição do tempo necessário para conclusão de cada uma das etapas do estudo, geração de proposições etc.
- Etapa 2 – coleta de dados e definição do modelo: houve a coleta de dados e informações sobre certos parâmetros relevantes da mina escolhida, o que serviu para formalização do modelo conceitual.
- Etapa 3 – validação do modelo conceitual: o modelo conceitual foi verificado e validado para conduzir a próxima etapa.
- Etapa 4 – elaboração do programa computacional e verificação: com base no modelo conceitual obtido, foi construído um modelo de simulação por meio do simulador ProModel<sup>®</sup>. Em seguida, foi verificado se o modelo construído se comporta como desejado e realizados os ajustes necessários.

- Etapa 5 – realização de execuções piloto: foram realizadas execuções do modelo, conservando os dados de entrada iniciais, com intuito de se obter embasamento para a sua validação.
- Etapa 6 – validação do modelo programado: nesta etapa, foi determinado se o modelo representava de forma ideal o sistema em análise.
- Etapa 7 – projeto dos experimentos: neste momento, houve a definição da duração das replicações, a quantidade de replicações, entre outras condições iniciais e configurações da simulação.
- Etapa 8 – realização das execuções de simulação: com o intuito de se obter os resultados das medidas de desempenho, foi executada a simulação.
- Etapa 9 – análise de resultados: mediante uso de técnicas estatísticas, foi feita a análise dos resultados alcançados.
- Etapa 10 – otimização dos cenários elaborados: o otimizador SimRunner® foi empregado para otimizar as medidas de desempenho selecionadas.
- Etapa 11 – comparação dos resultados: depois da otimização do cenário, foi realizada nova simulação do cenário para coleta dos novos resultados, de modo a efetuar análises e comparações estatísticas.
- Etapa 12 – documentação: a documentação foi realizada com o objetivo de facilitar a compreensão sobre a pesquisa e garantir a sua continuidade futura.

#### **4 RESULTADOS OBTIDOS**

O presente trabalho foi desenvolvido com base em um modelo que representa um cenário genérico baseado em dados de minas a céu aberto desenvolvidas em bancadas. Assim, foram representadas quatro frentes de lavra, cada uma com uma escavadeira e oito caminhões, os quais se dispõem em um formato básico de alocação estática. Assim, cada caminhão opera em uma determinada frente de lavra permanentemente durante a execução.

Para a otimização do modelo, mediante o uso do software SimRunner®, foram considerados os seguintes cenários: minimização do número de caminhões, que em geral, são responsáveis por considerável parte dos custos de operação de uma mina a céu aberto; maximização da produção mineral; e uma combinação de ambos os cenários mencionados.

Foram consideradas novas variáveis para a obtenção de novas informações dentro do modelo, sem modificar o funcionamento do mesmo. Estas são utilizadas como indicadores de desempenho adicionais. São elas:

- Número de pás (NpasE1 até NpasE4): conta o número médio de pás, efetuado em cada escavadeira durante a simulação para uma possível análise posterior. Foi calculado com base na aplicação de uma distribuição uniforme definida para a quantidade média de pás necessárias para se encher o caminhão utilizado no modelo.
- Tempo do caminhão no sistema (TC1 até TC4): calculado a partir do somatório do tempo, em minutos, utilizado para cada caminhão em sua determinada frente para percorrer o percurso da frente de lavra até o depósito. Isso inclui o tempo na fila, o tempo estimado para manobrar e descarregar e o tempo necessário para retornar a uma frente de lavra.
- Número de caminhões na fila: duas variáveis (tamanhoFila e tamanhoFilae) são usadas para calcular a quantidade de caminhões esperando para descarregar nos depósitos de minério e estéril, respectivamente. Estas se baseiam no tempo estimado para um caminhão manobrar e descarregar, além do número de caminhões que chegam durante este processo.

Depois do estudo e da implementação das novas variáveis, foram realizadas execuções do modelo, considerando 30 replicações e um turno com duração de 6,5 horas. Após a execução, os resultados foram apresentados em tabelas no Output Viewer<sup>®</sup> (ferramenta estatística integrada ao ProModel<sup>®</sup>).

Para a Tabela 1, foram organizadas três medidas de desempenho (M. des.): tempo médio no sistema (t. m. s.), número de transportes (nº trans.) e produção total (p. min. (t)) para servirem de referência básica. Como pode ser notado, o tempo médio do minério no sistema foi de 187,05 minutos, a quantidade média de transportes realizados foi de 109,33 transportes e a produção média de minério no período analisado foi de 1.495,2 toneladas. A quantidade de 30 replicações foi considerada satisfatória, pois os semi-intervalos de confiança (*half-width* ou H-w) não ultrapassaram o limite de 10% da média amostral, conforme definido para a pesquisa.

Tabela 1. Referência básica.

M. des.	méd.	máx.	mín.	desv. pad.	H-w
t. m. s. (min)	187,05	213,52	162,13	13,66	5,11
nº trans.	109,33	125	88	8,04	3
p. min. (t)	1.495,2	1.980	1.008	243,57	90,95

Para a Tabela 2, foram ordenadas as três novas medidas de desempenho adicionadas no modelo, para servirem como uma referência adicional para a análise. Como pode ser observado, o maior número médio de pás foi da escavadeira 2 (NpasE2), a qual contabilizou a quantidade média de 856,07 pás. Já o tempo médio dos caminhões atribuídos no sistema foi da frente 3 (TC3), contabilizando 11.199,13 min. O tamanho médio da fila para descarregamento no depósito de

minério (tamanhoFila) foi de 0,73 caminhões e o tamanho médio da fila para descarregamento no depósito de estéril (tamanhoFilae) foi de 25,4 caminhões.

O processo de otimização foi baseado na construção de uma macro responsável pela variação dos parâmetros referentes ao número de caminhões em operação por frente de lavra no modelo, variando de um, que é o mínimo por frente de lavra para oito, que é o valor atual por frente. Esta variação ocorre durante o processo de otimização no software SimRunner®, a fim de se obter a melhor configuração de acordo com o cenário de otimização escolhido. O perfil de otimização escolhido para ser aplicado para os dois cenários foi o cauteloso e para cada um, foram realizados um total 360 experimentos.

Para este estudo, foram escolhidos dois cenários, a minimização do número de caminhões por frente, e a maximização da produção através do número de saídas. Como os dois cenários de otimização foram processados separadamente, estes também foram analisados um de cada vez.

O primeiro cenário processado envolveu a minimização do tempo médio no sistema, por meio da alocação ideal do número de caminhões por frente de lavra. Isso ocorre, pois os custos do maquinário são responsáveis por grande parte dos custos de operação de minas a céu aberto. Apesar da questão de os custos envolvidos na operação da mina não ser tratada neste estudo, é importante ressaltar a sua importância em um cenário real. Uma outra vantagem obtida a partir da redução do número de caminhões em operação é a redução dos congestionamentos. Nesse caso, considera-se especificamente as filas para os depósitos de minério e estéril, as quais têm como efeito a redução do tempo do minério no sistema e a redução do tempo ocioso de cada caminhão.

Tabela 2. Referência adicional.

<b>M. des.</b>	<b>méd.</b>	<b>máx.</b>	<b>mín</b>	<b>desv.pad.</b>	<b>H-w</b>
NpasE1 (pás)	802,5	900	675	113,4	42,34
NpasE2 (pás)	856,07	920	684	103,27	38,56
NpasE3(pás)	840	900	675	101,2	37,79
NpasE4(pás)	833,8	896	666	100,64	37,59
tamanhoFila (caminhões)	0,73	4	0	0,83	0,31
tamanho Filae (caminhões)	25,4	28	22	1,33	0,5
TC1 (min)	10.885,5	12.324	9.792	658,83	246,01
TC2 (min)	11.107,9	12.617	9.413	857,28	320,11
TC3 (min)	11.199,13	12.659	9.910	713,37	266,37
TC4 (min)	10.782,63	12.382	9.656	685,2	245,77

A partir da otimização com o objetivo de minimizar o tempo médio no sistema, o número de caminhões ideal obtido para cada frente de lavra é apresentado na Tabela 3. Os resultados apresentam as cinco melhores soluções em ordem decrescente.

A partir destes primeiros resultados, conclui-se que a configuração mais indicada é a I. A partir destes valores, foi definido o número de caminhões que operará em cada frente e, com isso, um novo cenário foi definido. Como pode ser visto na Tabela 3, a melhor alocação envolveu o uso de 7, 5, 6 e 4 caminhões, respectivamente, para as frentes de lavra 1, 2, 3 e 4.

Tabela 3. Minimização do tempo médio no sistema

Mel. sol.	Caminhões por frente				Exp.	F. Obj.
	F1	F2	F3	F4		
I	7	5	6	4	293	184.759
II	7	6	7	4	284	184.792
III	7	6	7	6	260	184.844
IV	6	5	8	3	242	184.864
V	7	6	8	4	268	184.865

Depois da modificação do número de caminhões no modelo, foi executada uma nova simulação e seus resultados foram ordenados nas Tabelas 4 e 5.

Tabela 4. Referência base (pós-minimização do número de caminhões).

M. des.	méd.	máx.	mín.	desv. pad.	H-w
t. m. s. (min)	184,76	115	85	6,45	83,13
n° trans.	104,03	205,67	159,64	11,8	76,32
p. min. (t)	1.316,4	1692	792	228,01	85,14

Os resultados obtidos a partir do Output Viewer<sup>®</sup> do simulador ProModel<sup>®</sup> são apresentados na Tabela 4. Nesta, é possível perceber uma redução no número de transportes e no tempo médio do sistema, com uma queda de 187,05 min (vide Tabela 1) para 184,76 min da média do tempo médio no sistema. Entretanto, para o número total de transportes, se obteve uma queda de 109,33 (vide Tabela 1) para 104,03 e, conseqüentemente, uma queda de 1.495,2 t para 1.316,4 t de minério.

Já na Tabela 5, observa-se que as variáveis NpasE1 até NpasE4 se mantiveram com valores constantes com relação a Tabela 2. As variáveis referentes as filas no depósito de minério apresentaram uma grande queda. Para ‘tamanhoFilae’ (referente a fila do depósito de estéril), que antes da otimização tinha em média 25,4 caminhões na fila. Já com a nova configuração, esta fila passou a ter em média 15,97 caminhões.

Salienta-se que para ‘tamanhoFilae’, a queda no valor máximo foi considerada relevante (de 28 caminhões para 19 caminhões). No caso da fila do depósito de minério, se obteve uma queda no valor médio da ‘tamanhoFila’ de 0,73 caminhão para 0,53 caminhão. Em termos práticos, esta queda média não é tão relevante, entretanto, para a mesma variável, nota-se também uma queda no valor máximo da variável, que caiu de quatro para três caminhões. Isso representa na prática uma economia de tempo e o aumento na disponibilidade do recurso caminhão.

Tabela 5. Referência adicional (pós-minimização do número de caminhões).

<b>M. des.</b>	<b>méd.</b>	<b>máx.</b>	<b>mín.</b>	<b>desv. pad.</b>	<b>H-w</b>
NpasE1	802,5	900	675	113,4	42,34
NpasE2	856,07	920	684	103,27	38,56
NpasE3	840	900	675	101,2	37,79
NpasE4	833,8	896	666	100,64	37,58
tamanhoFila	0,53	3	0	0,78	0,29
tamanhoFilae	15,97	19	14	1,35	0,51
TC1	8784	9681	8022	440,11	164,34
TC2	8940,3	9881	7827	542,52	202,58
TC3	9097,03	10049	8245	447,02	166,92
TC4	8693,33	9676	7940	421,74	157,48

Em relação as variáveis responsáveis por calcular o tempo médio de cada grupo de caminhões no sistema, TC1 até TC4 (Tabela 5), foram obtidas quedas bem relevantes, o que pode ser deduzido a partir da redução do número de caminhões e a redução das filas. Isso agilizou todo o processo e proporcionou uma redução do tempo no sistema.

O segundo cenário processado foi o de maximização do número de saídas, o que representa a maximização da produção mineral. Após a execução da otimização com objetivo de maximizar a produção de minério, e seguindo-se o perfil cauteloso do SimRunner® com a mesma configuração usada no cenário anterior, organizou-se os resultados obtidos na Tabela 6, incluindo-se as cinco melhores soluções em ordem decrescente.

A partir da análise das informações da Tabela 6, observa-se que o resultado alcançado foi corroborado conforme o esperado. A configuração possui o mesmo número de caminhões que maximiza a produção, conforme a configuração original, com oito caminhões por frente de lavra. Nota-se que dentro do intervalo definido e delimitado pelo modelo original, os melhores valores de produção vieram com os maiores números de caminhões em operação por frente trabalhada. Portanto, os resultados obtidos para este cenário são os mesmos obtidos por meio do simulador ProModel® e já apresentados nas Tabelas 1 e 2, referentes ao modelo antes da otimização.

Tabela 6. Maximização do número de saídas.

Mel. sol.	Caminhões por frente				Exp.	F. obj.
	F1	F2	F3	F4		
I	8	8	8	8	20	1.495.200
II	8	8	7	8	168	1.489.200
III	7	8	8	8	212	1.485.600
IV	6	8	8	8	152	1.484.400
V	8	7	8	8	217	1.482.000

Depois da definição e da otimização dos dois cenários realizados anteriormente de forma isolada, foi definido um novo cenário de otimização, o qual basicamente busca o melhor resultado com os dois objetivos comprovadamente opostos, por meio da análise dos resultados obtidos nas otimizações anteriores, sendo processados pelo otimizador simultaneamente.

Para a execução do processo de otimização com o objetivo de minimizar o tempo médio no sistema e ao mesmo tempo, maximizar o número de saídas, foi escolhido o perfil de otimização cauteloso. Após a execução, foram realizados pelo otimizador 242 experimentos, cujos resultados foram tabulados na Tabela 7.

Tabela 7. Maximização do nº de saídas x Minimização do tempo médio no sistema

M. sol.	Caminhões por frente				Exp.	Tot. (t)	T. m. s.
	F1	F2	F3	F4			
I	8	8	8	8	20	1.495.200	187.045
II	7	8	8	8	151	1.489.200	187.861
III	8	8	7	8	175	1.485.600	187.630
IV	8	8	6	8	234	1.484.400	189.448
V	8	7	8	8	156	1.482.000	187.237

A partir dos resultados obtidos por meio da otimização, observa-se que, assim como no caso da otimização com objetivo de maximização do número de saídas, o melhor resultado foi obtido com o máximo de caminhões por frente de lavra. Nesse caso, oito caminhões por frente e conseqüentemente, aproximadamente o mesmo valor para o total de saídas e tempo médio no sistema obtidos no cenário original (vide Tabela 1). Já o cenário da maximização do número de saídas apresentou o mesmo valor para o total de saídas, conforme apresentado na coluna função objetivo (F. obj – Tabela 6).

Vale ressaltar que esta semelhança pode ser considerada apenas para a primeira melhor solução, pois nas quatro soluções seguintes, apesar do número total de caminhões e da produção total serem os mesmos, a alocação se dá de forma diferente da apresentada segundo a Tabela 6, representando outros cenários possíveis.

## 5 CONCLUSÃO

No fim da análise e discussão dos resultados obtidos nos três cenários de otimização, nota-se que o primeiro cenário apresentou diferenças quando comparado aos demais cenários, sendo que nestes últimos o resultado ótimo foi idêntico. Com isso, conclui-se que há um *trade-off* entre o ganho com a redução de número de caminhões e o aumento do total de saídas (produção de minério), pois para se ter os benefícios da redução do número de caminhões no sistema, deve-se abrir mão de parte do potencial de produção. Além disso, para se obter a maior produção, deve-se ter o máximo de caminhões em operação por frente de lavra.

Em um cenário de uma mineradora real, esta escolha tenderia à maximização da produção. Afinal, é comum a existência de metas de produção, tanto para manter o volume de fornecimento para a demanda quanto para a própria regulação do processo, o qual deve sempre ser mantido constante. Assim, em termos práticos, a maximização da produção seria a escolha mais indicada, representando conseqüentemente, um sistema produtivo com mais máquinas em operação, maiores filas e ociosidade em alguns momentos.

Esta pesquisa contribui para a área acadêmica, por constituir um exemplo prático de utilização da otimização baseada em simulação. Também, contribui para a área empresarial, pois a discussão realizada pode ser utilizada como uma referência de como realizar o dimensionamento do número de recursos a serem utilizados em um sistema produtivo, de acordo com as metas estabelecidas pelos gestores.

Sugere-se para pesquisas futuras que seja testado o cenário com o objetivo de minimizar o tempo médio no sistema, em conjunto com a redução do número de caminhões em operação.

**REFERÊNCIAS**

- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Anuário Mineral Brasileiro Principais Substâncias Metálicas**. (Coord. Geral Osvaldo Barbosa Ferreira Filho; Equipe Técnica por Marina Dalla Costa et al.). Agência Nacional de Mineração – ANM, 2019. Disponível em: <[http://www.anm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/amb\\_2018.pdf](http://www.anm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/amb_2018.pdf)>. Acesso em: 15 de julho de 2020.
- ANDRADE, E. L. **Introdução à pesquisa operacional: métodos e modelos para a análise de decisão**. 2.ed. Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, 1998.
- ANTUNES, M. G. P.; SANTOS, J. R. T. Aplicação da modelagem e simulação computacional como ferramenta de otimização de processos do setor de pós-venda em uma empresa de prestação de serviços. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 5, n. 7, p. 7931-7943, jul. 2019. <http://dx.doi.org/10.34117/bjdv5n7-028>.
- ARAÚJO, F. C. R. de. **Planejamento operacional de lavra com alocação dinâmica de caminhos: abordagens exata e heurística**. 2008. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.
- BRYMAN, A. **Research methods and organization studies**. Uniwin Hyman, London, 1989.
- CARVALHO, M. C. M. de. **A construção do saber científico: algumas proposições**. (Carvalho, M. C. M. de (org.)). Papirus, Campinas, SP, 2.ed., pp. 63-86, 2000.
- COELHO, Guilherme Freitas et al. Análise do congestionamento do sistema produtivo de uma mina a céu aberto: comparativo entre soluções propostas por modelos de otimização e simulação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 46., 2014, Salvador. **Anais...** Salvador: SOBRAPO, 2014. p. 2818 - 2829. Disponível em: <<http://www.din.uem.br/sbpo/sbpo2014/pdf/arq0404.pdf>>. Acesso em: 09 maio 2019.
- CURI, A. **Lavra de minas**. Oficina de Textos, São Paulo, 2017.
- CURI, Adilson. **Minas a Céu Aberto: planejamento de lavra**. São Paulo: Oficina de Textos, 2014. 232 p.
- DESTRO, Elton. **Software para planejamento operacional de lavra, simulação e despacho de caminhos visando ao atendimento das metas de produção e qualidade da mistura de minérios**. 2015. 155 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015.
- FIESP. **Governo Federal anuncia medidas para aumentar competitividade e atratividade no setor mineral**. Agência Indusnet Fiesp, 2017. Disponível em: <https://www.fiesp.com.br/noticias/governo-federal-anuncia-medidas-para-aumentar-competitividade-e-atratividade-no-setor-mineral/>. Acesso em: 02 de julho de 2020.
- HARRELL, C.; GHOSH, B. K.; BOWDEN, R. O. **Simulation using ProModel**. McGraw-Hill, Boston, 2011.
- LAW, A. M.; KELTON, W. D. **Simulation Modeling and Analysis**. 3ª ed. McGraw-Hill, 2000.
- LUCENA, A. J. F.; GORGÔNIO, F. L.; BOCANEGRA, S. Utilização de modelagem e simulação no processo de atendimento de chamados em centrais de operações da polícia militar para otimização do uso de viaturas. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, n.6, p. 34086-34103, jun. 2020. <http://dx.doi.org/10.34117/bjdv6n6-091>.
- MAMBO, I. F. **Simulação da operação de carregamento e transporte numa mina a céu aberto de carvão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 72 f., 2017.
- MENA, Rodrigo et al. Availability-based simulation and optimization modeling framework for open-pit mine truck allocation under dynamic constraints. **International Journal of Mining Science And Technology**, [s.l.], v. 23, n. 1, p.113-119, jan. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmst.2013.01.017>.

MIGUEL, P. A. C.; Ho, L. L. Levantamento tipo survey. (Miguel, P. A. C. (Org.)). **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**, 2. ed, Elsevier, Rio de Janeiro, 2012.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Setor mineral representa 4 por cento do PIB brasileiro**. 2014. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial/outras-noticias?>>. Acesso em: 4 de abril de 2019.

OZDEMIR, Burak; KUMRAL, Mustafa. Simulation-based optimization of truck-shovel material handling systems in multi-pit surface mines. **Simulation Modelling Practice and Theory**, [s.l.], v. 95, p.36-48, set. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.simpat.2019.04.006>.

PANTUZA JÚNIOR, G. **Métodos de otimização multiobjetivo e de simulação aplicados ao problema de planejamento operacional de lavra em minas a céu aberto**. 2011. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.

PEREIRA, Ricardo Melo. **O uso da simulação na análise de cenários em operações de carregamento e transporte na Mineração Usiminas S.A.** 2016. 64 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

SUZEK, H.; BING, W. X. Aumento de produtividade em um sistema de produção através da simulação computacional. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, n.5, p.29847-29861 may. 2020. <http://dx.doi.org/10.34117/bjdv6n5-440>.

UPADHYAY, S. P.; ASKARI-NASAB, H. Simulation and optimization approach for uncertainty-based short-term planning in open pit mines. **International Journal Of Mining Science And Technology**, v. 28, p.153-166, Elsevier BV, 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.12.003>.