



Rem: Revista Escola de Minas

ISSN: 0370-4467

editor@rem.com.br

Escola de Minas

Brasil

Brandão, Reinaldo; Tomi, Giorgio de  
Metodologia para estimativa e gestão da produtividade de lavra  
Rem: Revista Escola de Minas, vol. 64, núm. 1, enero-marzo, 2011, pp. 77-83  
Escola de Minas  
Ouro Preto, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56418762010>

- Como citar este artigo
- Número completo
- Mais artigos
- Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica  
Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal  
Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

## Metodologia para estimativa e gestão da produtividade de lavra

### *Mining productivity estimation and management methodology*

**Reinaldo Brandão**

Doutorando em Engenharia Mineral, EPUSP  
[reinaldo.brandao@vmtubes.com.br](mailto:reinaldo.brandao@vmtubes.com.br)

**Giorgio de Tomi**

Engenheiro de Minas,  
Professor Associado, EPUSP  
[gdetomi@usp.br](mailto:gdetomi@usp.br)

### Resumo

Apesar da crise econômica global do final de 2008, a expectativa para o consumo de aço nos países do grupo dos BRICs - Brasil, Rússia, Índia e China - é de que haja um aumento significativo nas próximas décadas, em função de seu atual baixo consumo per capita. Como a abertura de novas minas para suprir o aumento da demanda do setor siderúrgico está limitada por questões ambientais, sociais, de mão-de-obra, energia e fornecimento de equipamentos, o aumento da produtividade das operações existentes será um fator essencial. Na indústria de mineração, métodos de estimativa têm sido usados há décadas na gestão de produtividade. As maiores dificuldades para a estimativa de produtividade de uma mina incluem a obtenção dos dados necessários e a complexidade da criação do modelo. No presente trabalho, apresenta-se o desenvolvimento de uma nova abordagem para a estimativa de produtividade de lavra a partir de regressões múltiplas com base em dados operacionais da mina. Essa abordagem integra a Metodologia de Estimativa e Gestão de Produtividade de Minas (MEGPM), cuja aplicação se justifica pela obtenção de ganhos em eficiência, a partir da eliminação das perdas no fluxo produtivo. Foram garantidos ganhos consideráveis com diminuição das diferenças entre os ICDs das turmas operacionais. As variáveis operacionais foram obtidas diretamente da base de dados do sistema de gerenciamento de operações e o desenvolvimento do modelo se deu de forma simples, de fácil aplicação com boa correlação entre os valores de produtividade estimados e obtidos. As etapas que compõem o desenvolvimento desse modelo de gestão, bem como um estudo de caso, serão apresentadas nesse trabalho.

**Palavras-chave:** Produtividade de lavra, gestão de mina, gerenciamento da produção de mina, planejamento de lavra.

### Abstract

Even with the financial crisis of 2008, the steel consumption forecast for the BRIC countries - Brazil, Russia, India and China - is for a significant increase over the next decades, due to their present low per-capita consumption level. The start up of new mines to supply this increase in demand is likely to be limited due to legal and practical restrictions related to environmental, social, manpower and energy issues. Therefore, most of the new demand for iron ore will be supplied by increasing the productivity of mines currently in operation. The main challenges for managing mine productivity are related to the choice of the estimation method, due to the difficulties in collecting appropriate information and to the establishment of a representative model. This article presents an estimation approach for mine productivity estimation through multiple regressions over the operational database of the mine. The approach is proposed through a Mine Productivity Estimation and Management tool (MPEM).

*which can deliver savings related to increased production efficiency by the identification and removal of losses in the mine production flow. Production improvement has been actually achieved in practical applications by managing the discrepancies in the KPIs of different operating shift crews. The operational variables have been identified directly over the operational database of the mine and the model has been developed in a simple and easy-to-use fashion, with excellent levels of correlation between the estimated and actual values of the mine's productivity. The article describes the development approach as well as the application of the model in a case-study.*

**Keywords:** Mine productivity, mine production management, mine planning.

## 1. Introdução

“A crise econômica global não impedirá que os países do grupo BRIC estejam entre as maiores economias do mundo” é o que afirma o próprio autor do conceito dos BRICs, Jim O'Neill, economista-chefe do banco de investimentos Goldman Sachs (Faulconbridge & Stott, 2009). Ao crescimento econômico dos países dos BRICs está associado o aumento de consumo de aço esperado, fato que pode ser entendido, quando se compara o consumo per capita de aço nesses países com o consumo dos outros países, como é mostrado na Figura 1.

Apesar de haver um grande potencial de aumento de demanda nos BRICs, o aumento da oferta de minério de ferro enfrenta algumas restrições: longo tempo de entrega de equipamentos de grande porte, o que está aumentando - falta de mão-de-obra qualificada - escassez na oferta de energia elétrica - limitações em logística e dificuldades de obtenção de novas licenças por questões ambientais e sociais.

Considerando essas restrições, o aumento de produtividade das operações de lavra de minério de ferro existentes pode garantir o suprimento da demanda

crescente no curto prazo, sem a necessidade de novos investimentos, garantindo, ainda, a diluição de custos operacionais e o aumento da competitividade das minas.

No intuito de maximizar a produtividade de operações de mina, o uso de métodos de simulações tem sido explorado desde a década de 60. A pesquisa bibliográfica indicou que, entre os maiores obstáculos, para o uso da simulação, pela indústria de mineração, a complexidade envolvida na construção de um modelo e o tempo requerido para tal se constituem em um desses grandes obstáculos (Shi & AbouRizk, 1997; AbouRizk & Halpin, 1992; Paulson et al., 1983). O uso de análise regressional para estimativa de produtividade de operações de minas obteve bons resultados (Smith et al., 2001), no entanto o modelo criado só pode ser utilizado, com segurança, nas condições operacionais nas quais os dados estejam baseados. Fora dessas condições, o modelo pode apresentar resultados incoerentes, como é o caso de sistemas com mais de uma escavadeira ou de sistemas com utilização não equilibrada de recursos.

No artigo aqui apresentado, os dados relativos à operação de uma mina vão

alimentar um processo de regressões múltiplas lineares para a determinação de um modelo de estimativa de produtividade. O ciclo produtivo analisado basicamente é composto pelas etapas de carregamento e transporte, que se inicia com a chegada do caminhão à frente de lavra, com a fila para carregamento, com a manobra, com o carregamento, com a viagem cheio, com a chegada ao local de basculamento, com a fila para bascular, basculamento e com a viagem vazio.

A determinação da ferramenta de estimativa de produtividade permitirá a quantificação dos impactos dos desvios dos ICDs sobre a produtividade (Indicadores Chave de Desempenho - ICDs, são variáveis críticas, mensuráveis usadas no monitoramento de processos, isto em relação a metas estabelecidas). Essa análise é importante na determinação das ações que trazem melhores resultados a menor custo, sendo fundamental para a maximização da eficiência do sistema produtivo. A maximização da eficiência se dá a partir da eliminação das perdas do processo. A eficiência de um sistema de produção depende da eficiência com que são utilizados os equipamentos, os

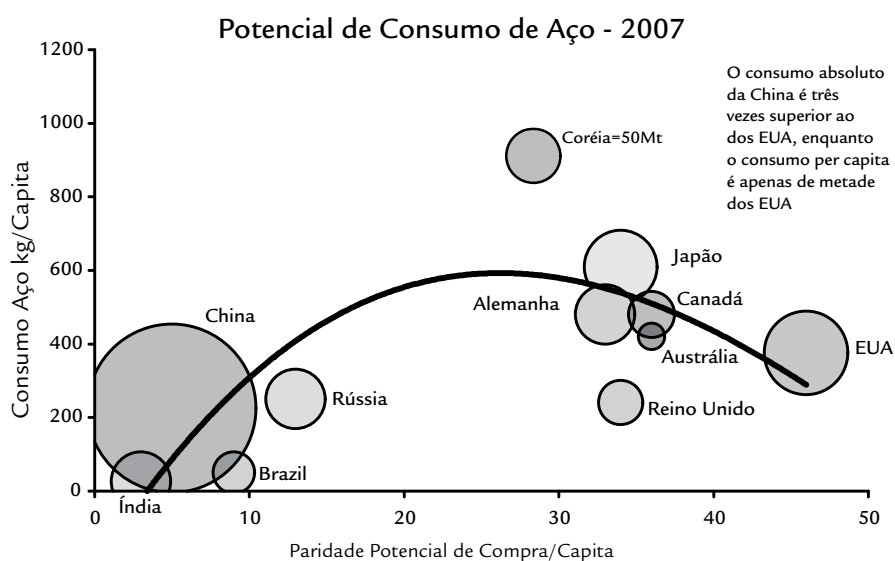


Figura 1  
Projeção de consumo *per capita* de aço no mundo.

materiais, as pessoas e os métodos (Suzuki, 1992). A melhoria na eficiência da produção implica identificar e eliminar as perdas associadas a cada componente

## 2. Metodologia

Pesquisas anteriormente apresentadas mostraram um alto grau de complexidade na construção do modelo de simulação, além de requerer grande conhecimento por parte dos usuários (Smith et al., 2001). Com o intuito

### - Etapa 1 - Coleta de dados

A partir dos dados do sistema de gerenciamento de operações, foram tomadas, em base diária, relativo a um período de um ano de operação, as seguintes variáveis: tempo de fila em escavadeiras,

### - Etapa 2 - Geração da função produtividade

Os dados operacionais coletados foram submetidos a uma análise, no intuito de se gerar uma função para estimativa da produtividade - a FP. O método utilizado, nessa análise, foi o de regressão linear múltipla. A análise de regressão linear múltipla é uma ferramenta poderosa, que permite ao

### - Etapas 3 e 4 - Identificação de desvios e implementação de ações corretivas

A metodologia proposta, a partir da determinação da FP, é utilizada para quantificar o impacto dos desvios dos ICDs sobre a Produtividade Estimada.

## 3. Estudo de caso

A MEGPM foi aplicada em um estudo de caso, em uma mina de ferro a céu aberto de grande porte, situada no quadrilátero ferrífero, estudo este exposto a seguir. Nesse estudo, para o desenvolvimento da MEGPM, foram analisados os dados obtidos do sistema de gerenciamento de operações da mina, agrupados em base diária, relativos a um ano completo de operação.

Primeiramente, reuniram-se os dados referentes a velocidade vazio (km/h), velocidade cheio (km/h) e velocidade média (km/h), relação km cheio/km vazio (adimensional), fila em escavadeiras (%), fila em basculamento (%) e fila média (%), tempos de manobra (minutos), carregamento (minutos) e basculamento (minutos), DMT - distância média de

do processo produtivo (equipamentos, materiais, custos, entregas, segurança e meio ambiente).

Nos tópicos a seguir serão apre-

de se estimar a produtividade de uma operação de mina e de se possibilitar a sua gestão, através de um modelo de fácil construção e utilização, foi desenvolvida a MEGPM, que foi aplicada e testada em uma mina, sendo os

tempo de manobra dos caminhões, tempo de carregamento, carga média, velocidade de cheio, distância média de transporte (DMT), tempo de fila em basculamento, tempo de fila médio, tempo de bascu-

pesquisador aprender mais sobre as correlações dentro do banco de dados estudados. Existem muitos textos que descrevem essa técnica, e a teoria por trás de seu uso não será discutida em detalhe aqui.

Para estimativa dos coeficientes da equação, foi utilizado um software

Uma vez determinados esses impactos, são traçados planos de ações para corrigir os desvios. Essas ações são, então, ordenadas segundo sua relação de custo e benefício.

transporte (km), carga média (t) e média pluviométrica (mm).

A partir desse grupo inicial, obteve-se o melhor subgrupo de variáveis, por meio de regressões. O melhor subgrupo é o que contém as variáveis cuja regressão apresenta o menor valor de S (desvio-padrão), o valor de R-sq (índice de correlação) mais próximo de 100, além de se dar preferência para conjuntos com menor número de variáveis envolvidas, no caso de apresentarem S e R-Sq com valores aproximados - isto é o que diz o princípio da parcimônia.

Dessa forma, o subgrupo escolhido, com valores de R-sq de 98,7 e S igual a 4,5, alimentou um processo de regressões múltiplas lineares. A FP gerada pelo processo de regressões múltiplas lineares é

sentadas as etapas do desenvolvimento da Metodologia de Estimativa e Gestão de Produtividade de Minas (MEGPM) objeto desse estudo.

resultados discutidos mais adiante. O desenvolvimento e a aplicação dessa metodologia representam a principal contribuição desse trabalho. As etapas de seu desenvolvimento são mostradas a seguir:

lamento, velocidade vazio, velocidade média, relação km cheio/km vazio. Além desses, foram coletados, também, valores de precipitação pluviométrica diária para o período.

de estatística de distribuição gratuita. Diversos softwares gratuitos, para essa aplicação, estão disponíveis na internet.

Para escolha do melhor subconjunto de variáveis a ser utilizado na determinação da FP, os dados foram submetidos a uma análise de regressão, sendo, então, avaliados os resultados obtidos.

A partir da implementação das ações, os resultados são monitorados.

apresentada a seguir:

Produtividade Estimada =  $-15,2 + 19,7 \text{ Velocidade Média} + 151 \text{ Relação kmCh/kmVz} - 14,6 \text{ Fila Médio} - 21,5 \text{ Tempo de Manobra} - 17,0 \text{ Tempo de Carregamento} - 14,2 \text{ Tempo de Basculo} - 110 \text{ DMT} + 2,00 \text{ Carga Média}$

As variáveis com maior influência sobre a produtividade são a DMT e a Velocidade Média. Isto pode ser comprovado avaliando-se o valor do produto dos coeficientes dessas variáveis pelo valor médio da variável no período observado. A distribuição dos valores da DMT e da Velocidade Média, ao longo do período analisado, pode ser vista na Figura 2.

A comparação entre os valores de Produtividade Estimada e Realizada diária para o período analisado é mostrada

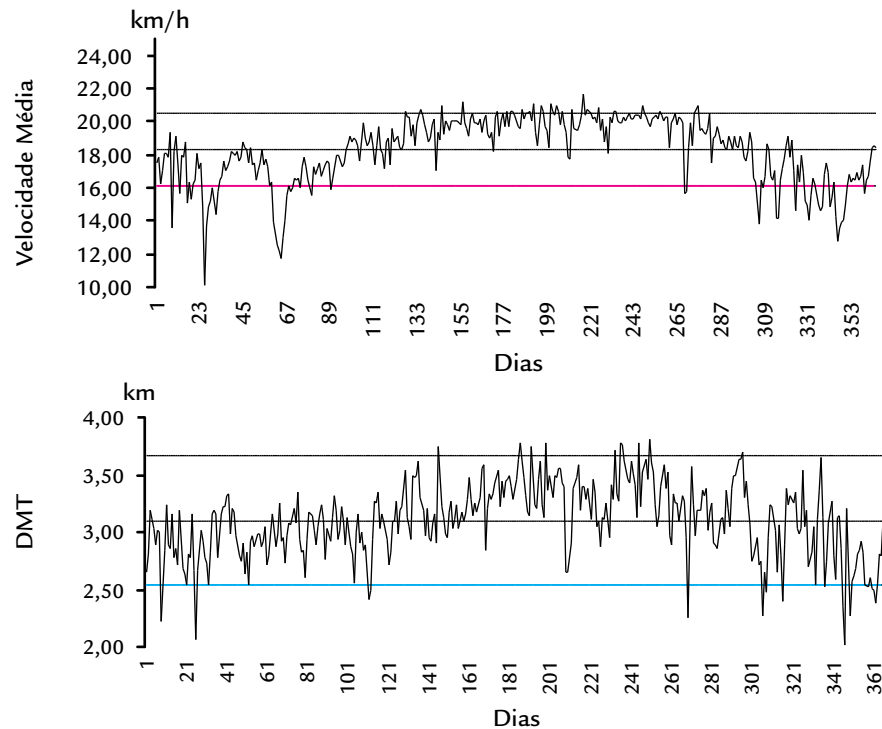


Figura 2  
Distribuição dos valores de DMT e velocidade média.

na Figura 3. Para esse período, há uma correlação de 98,8% entre a Produtividade Estimada e a Realizada.

A partir da validação da FP, a próxima etapa foi estabelecer uma linha-base

como referência para avaliação da efetividade da aplicação da MEGPM proposta. Para tal, tomou-se, como referência, o mês de novembro de 2006. Os valores da Produtividade Realizada e Estimada, bem

como das variáveis utilizadas na função, tomadas como ICDs para esse período, são mostrados na Tabela 1. Nesse estudo, o valor de Produtividade se refere ao total de toneladas que cada unidade da frota

Turma	A	B	C	D	E
Produtividade realizada (t/h)	399.8	380	391.4	408.4	383.8
Produtividade estimada (t/h)	405.5	380.7	393.7	414.2	384
Velocidade média (km/h)	16.8	17.7	17.4	16.7	17.3
Relação km cheio / km vazio	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Fila em depósito (%)	1.5	0.9	1.2	1.0	1.4
Fila em carregamento (%)	4.8	6.3	5.5	4.5	5.4
Tempo de manobra (minutos)	1.4	1.6	1.4	1.4	1.4
Tempo de carregamento (minutos)	3.7	3.7	3.7	3.6	3.7
Tempo de basculamento (minutos)	2.1	1.9	1.7	1.8	2.1
Distância média de transporte (km)	3.2	3.5	3.4	3.2	3.5
Carga média (t)	209.7	210.1	209.0	210.2	212.6

Tabela 1  
Produtividade realizada, produtividade estimada e ICDs.

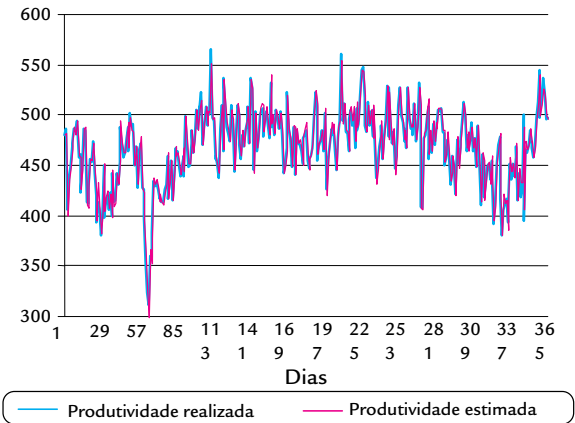


Figura 3  
Produtividade estimada e realizada.

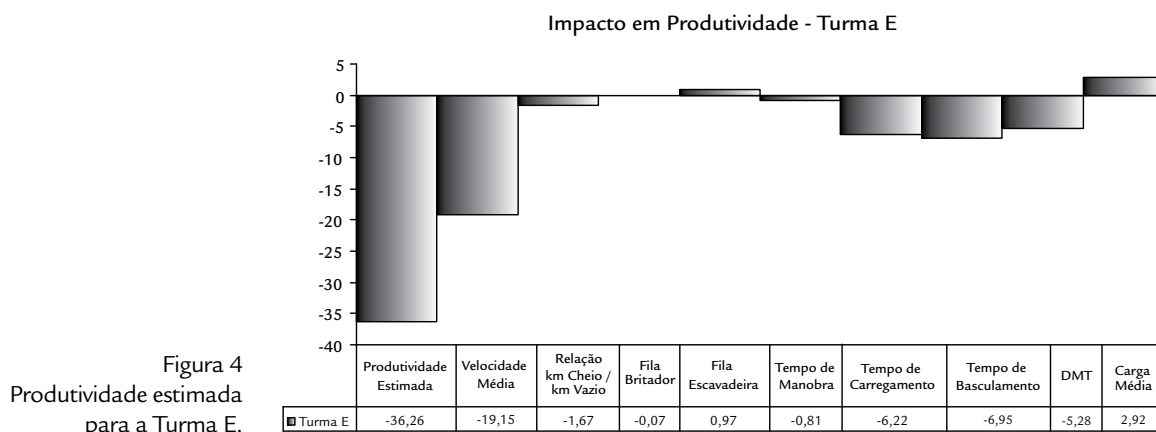


Figura 4  
Produtividade estimada  
para a Turma E.

de carregamento transporta por hora trabalhada.

A Figura 4 mostra a Produtividade Realizada por turma, em novembro de 2006, comparada com a meta estabelecida no período. Nota-se uma grande diferença entre os valores praticados pelas diferentes turmas, sendo a Turma B a de menor produtividade e a Turma D a de maior produtividade.

Com a utilização da FP, analisando-se a performance da Turma E, por exemplo, identificou-se uma perda total de 36,26t/h devido a sua Velocidade Média (-19,15t/h), Tempo de Carregamento (-6,22t/h), Tempo de Basculamento (-6,95t/h) e DMT (-5,28t/h). Essa análise é vista na Figura 4.

Análises similares que foram realizadas com cada uma das turmas e com os grupos de melhoria contínua determinaram as causas fundamentais dos desvios nos ICDs. Ações foram propostas para correção desses desvios, sendo ordenadas segundo seu custo e benefício. As principais ações são mostradas na Tabela 2.

A análise do ICDs mostrou oportunidades de ganhos, principalmente em Velocidade e Tempo de Carregamento. A perda total de Produtividade Estimada por desvios em Velocidade Média das turmas ultrapassou 25 t/h por unidade de transporte. Dessa forma, grande parte das ações propostas para aumento de produtividade se concentrou na gestão da velocidade.

Uma das causas das perdas de ve-

locidade são os projetos e as condições de manutenção inadequados das vias de transporte na mina. A primeira ação tratou do monitoramento dos acessos e praças a partir da instrumentação de um dos caminhões da frota com acelerômetros conjugados a um GPS que informava a central de operações as coordenadas X, Y e Z dos pontos da mina onde havia forças excessivas longitudinais, laterais e verticais nos pneus dos caminhões, causadas por irregularidades nas pistas, curvas fechadas e rampas acentuadas. A partir desses dados, um relatório, indicando as prioridades de manutenção dos acessos, era enviado diariamente à equipe de infra-estrutura. Esse sistema foi desenvolvido, implementado e testado, trazendo bons resultados à opera-

Tabela 2  
Lista de ações levantadas  
e implementadas.

Item	O quê?	Como?	Quem?	ICD	Quando? (Previsto)
1	Monitoramento de pneus	Monitorar e corrigir os pontos de maior impacto em pneus (perda de velocidade) nas diversas rotas da mina através do sistema de monitoramento. O relatório gerado diariamente pelo despacho indicando os pontos prioritários para os trabalhos de manutenção de pistas será enviado à equipe de infraestrutura.	Planejamento Operação de Mina Infra-estrutura	Densidade de pontos críticos (acima da aceleração-limite)	11/15/06
2	Velocidade do despacho	Serão gerados e disponibilizados relatórios diários indicando os pontos de menor velocidade dos caminhões na mina. Esses dados servirão de base para programação de manutenção de pistas da infraestrutura.	Planejamento Operação de Mina Infra-estrutura	Velocidade média por trecho	11/15/06
3	Dimensionamento das frotas por distância equivalente	Utilizar dados de distância equivalentes para determinação do dimensionamento das frotas, buscando maior precisão nos valores de velocidade e produtividade obtidos.	Planejamento	Relação entre produtividade programada e realizada	12/15/06
4	Relatório on-line de velocidade	Disponibilizar on line relatório de HAO por velocidade no turno em andamento que servirá como indicativo das condições atuais de operação. O CCO acompanhará continuamente o processo, informando à supervisão de operação e infraestrutura os desvios apontados.	Planejamento Operação de Mina Infra-estrutura	Velocidade média	11/15/06
5	Diferenças de velocidade por circuito de transporte	Determinar os principais circuitos geradores de perda em produtividade por baixa velocidade, atuando nas suas causas.	Planejamento Operação de Mina Infra-estrutura	Velocidade média por circuito	15/11/2006
6	Diferenças de performance entre os equipamentos de transporte	Criar procedimento para priorizar os equipamentos de transporte de melhor performance nas situações mais críticas de operação (ex. chuva, neblina, circuitos mais problemáticos, etc).	Planejamento Operação de Mina Infra-estrutura	Velocidade média por equipamento	11/10/06
7	Diferenças de performance entre os equipamentos de transporte	Identificar, relatar e enviar a área responsável possíveis problemas de manutenção que possam estar causando baixa performance.	Planejamento Operação de Mina Infra-estrutura	Velocidade média por equipamento	11/10/06

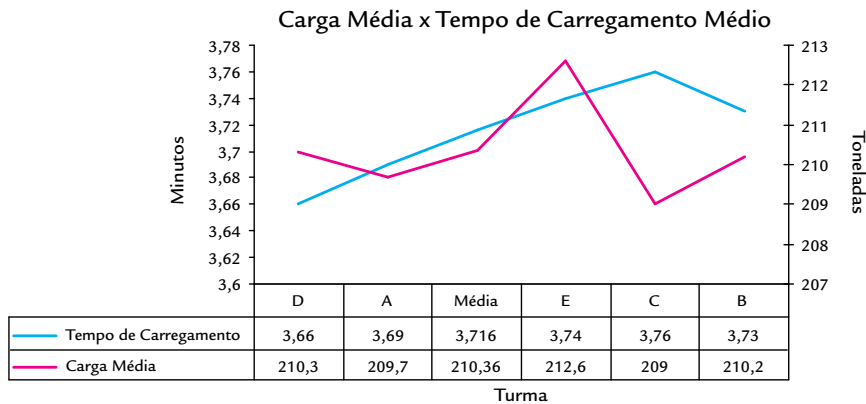


Figura 5  
Tempo de carregamento por turma.

ção, em termos de ganhos de velocidade e eficiência, além de ganhos em manutenção com aumento de vida útil de componentes, principalmente pneus.

Foi implementado um relatório em tempo real, mostrando a variação das velocidades nos diversos pontos da mina, enviado ao Planejamento, Operação de Mina e Infra-Estrutura a cada turno. Uma vez identificadas as causas das variações, a área responsável tratava da solução da questão.

O segundo ICD com maior potencial de ganho é o Tempo de Carregamento. A análise dos dados operacionais mostrou que os tempos de carregamento das turmas tendem a crescer com a carga média.

A turmas B e C, apesar de apresentarem um tempo de carregamento alto, acima da média, apresentam um valor de Carga Média abaixo da média (Figura 5). Identificou-se a necessidade de treinamento dos operadores de carga, principalmente em relação ao posicionamento das escavadeiras, ao ângulo de giro de carregamento e à operação de pré-manobra, que consiste em iniciar a manobra de posicionamento antes do término da carga do caminhão anterior.

A análise do tempo de carregamento hora a hora mostrou que o tempo de carregamento era maior na primeira hora dos turnos. Isso acontecia porque o operador, durante o turno, realizava a

pré-carga, onde se escava a face do talude para desmontar material a ser carregado, fato que facilitava o seu carregamento. À medida que o turno avançava, era dada preferência para se carregar o material previamente preparado, principalmente na última hora. Ao final do turno, todo o material desmontado havia se esgotado e, no início do novo turno, a operação de pré-carga se iniciava novamente, aumentando os tempos de carregamento. Foi proposto treinamento dos operadores, orientando a preparação de material para o turno posterior. A Figura 6 ilustra o tempo de carregamento hora a hora.

O Tempo de Carregamento de estéril, ao longo do ano de 2006, mostrou

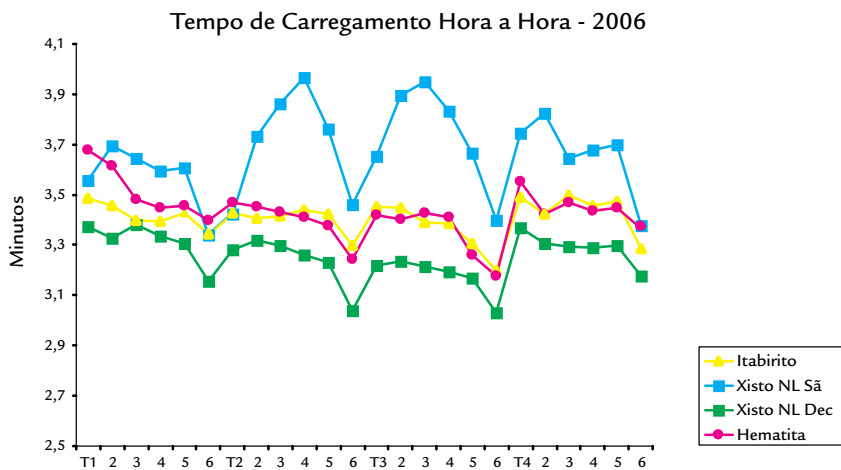


Figura 6  
Tempo de carregamento por hora.

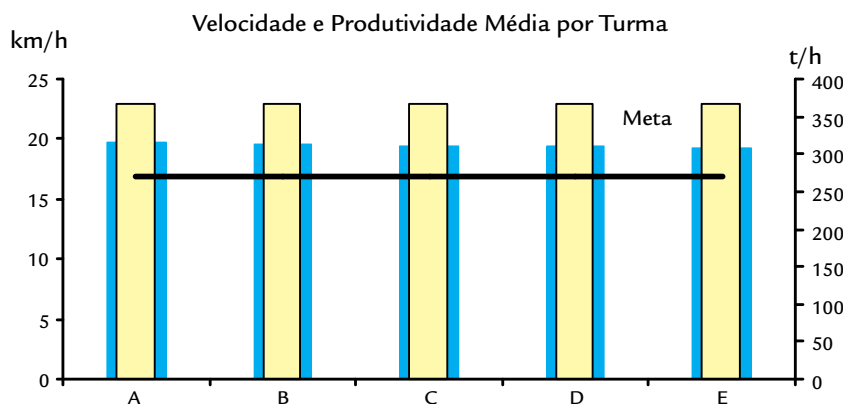


Figura 7  
Velocidade média e produtividade por turma - março 2007.

um aumento expressivo, explicado pelo aumento do volume lavrado de rochas do tipo xisto, de maior resistência. Dessa forma, uma maior eficiência no desmonte desse material foi solicitada.

Além dessas ações, realizaram-se o

mapeamento e a divulgação de melhores práticas nas operações de manobras, carregamento, transporte, bem como do gerenciamento de filas pelos supervisores e operadores do sistema de gerenciamento de operações.

Seis meses após o início da implementação das ações propostas, os valores de Velocidade Média superaram a meta estabelecida e o desvio em produtividade entre as turmas operacionais diminuiu em relação ao mês de novembro (Figura 7).

#### 4. Conclusões

A gestão da produtividade permite a redução imediata dos custos operacionais de uma mina. A possibilidade de utilizar uma ferramenta para quantificação dos impactos dos ICDs sobre a produtividade permite uma ordenação das ações e visam corrigir esses desvios e maximizar a produtividade pela eliminação das perdas do processo produtivo. Dessa forma, priorizam-se as ações que trazem maiores benefícios com baixo custo de implementação.

Um modelo de gestão baseado nessa ferramenta, MEGPM, de fácil desenvol-

vimento e aplicação foi implementado em uma mina de grande porte, onde se obteve uma correlação de 98% entre a Produtividade Estimada e a Realizada. Nessa mina, após terem sido analisadas as causas dos desvios nos ICDs, foram implementadas ações corretivas efetivas, diminuindo as diferenças entre as turmas operacionais em relação às metas estabelecidas, com ganho considerável em produtividade global.

A metodologia proposta pode ser, futuramente, integrada aos sistemas de gerenciamento de operação de mina. Nesses

sistemas, o processo de análise dos fluxos produtivos por unidades de carregamento e transporte levará em consideração a Produtividade Estimada, implementando ações corretivas sugeridas, monitoradas e gerenciadas automaticamente pela central de controle do sistema. Essa iniciativa permitirá que o ciclo gerencial comum aos sistemas de automação seja incorporado à operação de mina, não somente gerando informações, mas, também, sugerindo ações corretivas para os desvios detectados sobre as variáveis-chave a serem controladas no processo.

#### 5. Referências bibliográficas

- ABOURIZK, S. M., HALPIN, D. W. Modeling input data for construction simulation. *Proc. 8th National Conf. on Computing in Civ. Engrg.*, Dallas, Texas, June 7-9, p.1147-1154, 1992.
- FAULCONBRIDGE, G., STOTT, M. Crisis Speeds BRIC Rise to Power: Goldman's O'Neill. Reuters (online), June 9, 2009, acessado 16 Junho 2009.
- PAULSON, B. C., DOUGLAS, S. A., KALK, A., TOURAN, A., VICTOR, G. A. Simulation and analysis of construction operations. *J. Tech.Topics in Civ. Engrg., ASCE*, v. 109, n. 2, p. 89-104, 1983.
- SHI, J., ABOURIZK, S. M. Resource-based modeling for construction simulation. *J. Constr. Engrg. and Mgmt., ASCE*, v. 123, n. 1, p. 26-33, 1997.
- SMITH, S. D., OSBORNE, J. R., FORDE, M. C. Analysis of earth-moving systems using discrete-event simulation. *J. Constr. Engrg. and Mgmt., ASCE*, v. 121, n. 4, p. 388-396, 1995.
- SUZUKI, T. *New Directions for TPM*. Cambridge, Massachussetts: Productivity Press, 1992, p. 133-141,