

Productivity Estimation to Diagnosis Support in Bauxite Open-pit Mine Using Fuzzy Logic

M. D. B. Silva, K. C. S. Cavalcante, C. M. Affonso, and F. E. L. Picanço

Abstract— This paper proposes a methodology to estimates the productivity and support the diagnosis in an open-pit mine using fuzzy logic. The variables used in the estimation process are: loading queues, dumping queues, relocation time and cycle time. After the estimation, a detailed analysis of the unproductive hours is applied in order to identify which fuzzy rules are active. The results shows which key performance indicators (KPIs) are responsible for the low productivity in the mine. Then, it is possible to establish actions aiming to maximize productivity and reduce operational costs in the mine. The proposed method was applied on Paragominas mine located in the east of the state of Para, Brazil.

Keywords— Mine productivity, mine production management, open-pit mine, fuzzy logic.

I. INTRODUÇÃO

A REALIDADE do mercado globalizado atual exige das empresas a redução contínua de custos e a maximização da produção. As atividades operacionais em uma mina a céu aberto se enquadram nesta realidade e compreendem basicamente duas grandes etapas: a extração do minério e o seu processamento. A etapa de processamento do minério é limitada principalmente pelo desempenho de equipamentos, atingindo mais facilmente a máxima produtividade. Já a etapa de extração do minério refere-se ao seu carregamento e transporte até o local onde o mesmo será processado, envolvendo procedimentos manuais difíceis de serem controladas como o uso de caminhões para transporte da bauxita, influenciado por fatores como quebra de veículos, filas para carregamento e outros.

Sabe-se que as atividades de operação em lavra somam entre 30% e 40% dos custos totais de produção [1]. Assim, a política de produtividade de uma mina visa realizar o despacho dos caminhões de modo a maximizar a utilização dos equipamentos, reduzindo as filas no carregamento de caminhões nas frentes de lavras e as filas de basculamento na área do britador, os quais são os principais atrasos operacionais que impactam diretamente na produtividade da mina. Como a alocação precisa de caminhões pode resultar em uma economia significativa, diversos métodos têm sido desenvolvidos visando aumento da produtividade no planejamento operacional de uma mina a céu aberto [2,3]. A referência [4] apresenta um método híbrido que utiliza meta-heurísticas para o planejamento operacional em uma mina a

céu aberto utilizando alocação dinâmica de caminhões. Em [5] uma nova formulação multi-objetivo é apresentada para o problema de planejamento operacional de lavra com alocação dinâmica de caminhões. A referência [6] apresenta uma nova abordagem multi-estágio para o despacho dinâmico de caminhões em uma mina a céu aberto, utilizando otimização multi-objetivo e simulação de eventos. O método é implementado no software comercial SmartMine® da Devex SA. Já a referência [7] apresenta uma análise de cenários de produção via simulação, visando dar suporte ao gerenciamento de uma mina. Para tal faz-se necessário a análise de diversos relatórios e a coleta de dados envolvidos nas operações da mina, como tipo e capacidade dos equipamentos, produção da mina, número de equipamentos e tempos de duração de diversas atividades. Em [8] procura-se estimar a produtividade de uma mina através de regressões lineares com base nos dados de operação da mina.

A utilização de inteligência computacional em processos reais tem sido explorada cada vez mais nos últimos anos, de modo a estimar ou identificar relações desconhecidas a partir de dados reais do processo. Neste sentido pode-se mencionar a referência [9], que propõe o uso de algoritmos genéticos para realizar o despacho ótimo de caminhões em uma mina. Em [10] propõe-se um modelo de despacho de caminhões utilizando lógica fuzzy, visando ao atendimento de políticas excludentes como aumento de produtividade dos equipamentos e atendimento da qualidade do minério.

Nesse contexto, este artigo propõe a estimação da produtividade para auxílio ao diagnóstico do ciclo operacional de uma mina a céu aberto utilizando lógica fuzzy. A lógica fuzzy é utilizada para traduzir uma informação de caráter impreciso ou vago expressa por um conjunto de regras linguísticas, aproximando a lógica executada por uma máquina à tomada de decisão de um ser humano [11]. A utilização da lógica fuzzy em áreas de tomada de decisão proporciona o desenvolvimento de ferramentas rápidas e de fácil compreensão [12]. O método proposto foi aplicado na mina de Paragominas localizada no estado do Pará, Brasil. Neste artigo, realizou-se a análise considerando os dados de três frentes de minério. As variáveis utilizadas para estimação da produtividade são: fila de carregamento, fila no basculamento, tempo de manobra e tempo de ciclo. Os resultados mostram que o método é eficiente, sendo capaz de informar ao operador do sistema de modo on-line as condições de produtividade da mina e os fatores causadores de redução da produtividade.

As próximas seções deste artigo estão organizadas da seguinte forma. A seção 2 descreve o processo de extração do minério em minas a céu aberto. A mina em estudo neste artigo é apresentada na seção 3 e os indicadores chave de

C. M. Affonso, Universidade Federal do Pará (UFPA), Belém, Pará, Brasil. Email: carolina@ufpa.br

M. D. B. Silva, Mineração Paragominas S.A., danielysilva@hotmail.com

K. C. S. Cavalcante, Mineração Paragominas S.A., kassiamat@hotmail.com

F. E. L. Picanço, Mineração Paragominas S.A., epicanco@uol.com.br

desempenho utilizados são apresentados na seção 4. A seção 5 apresenta os conceitos fundamentais da lógica fuzzy utilizada no método para estimação e diagnóstico da produtividade. A seção 6 apresenta a metodologia proposta. Os resultados são apresentados na seção 7. Finalmente, a seção 8 apresenta as considerações finais.

II. PROCESSO DE EXTRAÇÃO DO MINÉRIO

O processo de extração da bauxita em uma mina a céu aberto é composto basicamente pelas etapas de carregamento nas frentes de lavra e seu transporte até o britador. As frentes de lavra são os pontos da mina onde o minério é retirado e o britador é o local onde o minério é despejado para beneficiamento. A Fig. 1 ilustra o processo operacional de extração do minério, onde os caminhões se deslocam das frentes de lavra para o britador.

Durante a etapa de carregamento, os caminhões ficam em fila nas frentes de lavra para carregar, fazem manobras e seguem viagem com carga cheia até o britador, onde ficam em fila novamente para bascular. O basculamento pode ocorrer no britador, dando início ao processo de beneficiamento, ou em pilhas de minério também conhecidas como estoques, quando o britador está inoperante (em manutenção, por exemplo). Após o basculamento os caminhões retornam vazios para novo carregamento na frente de lavra. Denomina-se tempo de ciclo o tempo necessário para o caminhão carregar o minério na frente de lavra, efetuar o basculamento no britador e retornar para frente de lavra.

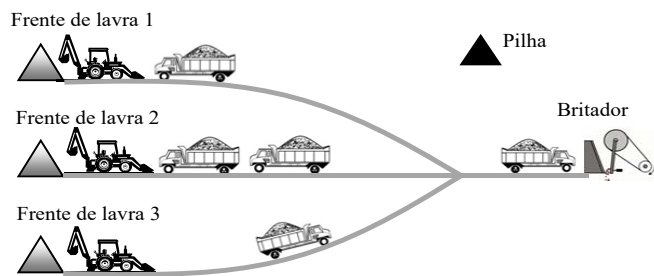


Figura 1. Processo operacional de extração do minério.

A produtividade de uma mina é expressa em toneladas/hora, medida pela produção de minério (*Run of Mine - ROM*) retirado das frentes de lavras com destino à usina de tratamento/beneficiamento ou estoques de minério. A maximização da produtividade de uma mina visa o aumento da taxa de utilização dos equipamentos, obtido pela redução do tempo em filas e de trajeto dos caminhões. O problema de maximização da produtividade de uma mina é complexo, e por esta razão é realizado por meio de uma ferramenta computacional específica, chamado de despacho [13,14]. O despacho refere-se a alocação de caminhões e equipamentos de carga visando o aumento da produtividade e atendimento das necessidades de qualidade da usina [15].

Mesmo com o uso de um sistema de despacho, diversos fatores podem ocasionar redução da produtividade da mina tais como:

- Fatores climáticos:

Em períodos de chuva a produtividade normalmente tende a cair devido à falta de visibilidade dos operadores e às más condições das vias.

- Erros operacionais:

Operadores com maior experiência possuem maior produtividade quando comparados a operadores novatos, uma vez que operam os equipamentos com maior eficiência. Estes erros ocorrem tanto nas equipes de despacho quanto nos operadores dos veículos.

- Carregamento parcial dos caminhões:

Muitos operadores carregam o caminhão abaixo do nível de carga estipulado para fazerem o percurso em menor tempo. Com isso, a produtividade da mina tende a ser reduzida.

- Atividades extras ou não previstas:

Equipamentos fora de operação por falha (manutenção não programada) e a falta não prevista de operadores são exemplos de atividades extras que contribuem para reduzir a produtividade da mina.

III. MINA EM ESTUDO

A mina de bauxita em estudo localiza-se a 67 km da cidade de Paragominas, no sudeste do estado do Pará, sendo esta a terceira maior mina de bauxita do mundo, com capacidade de produção da ordem de 10 milhões de toneladas anuais. A bauxita é esmagada e transportada por um conduto de 244 quilômetros até a cidade de Barcarena no estado do Pará, onde é refinada em alumina na Alunorte e enviada para produtores de alumínio no Brasil e outras partes do mundo. A Hydro Aluminium é proprietária de 60% da mineração em Paragominas, sendo os outros 40% de propriedade da companhia brasileira Vale.

A mina de Paragominas faz uso do programa comercial SmartMine® desenvolvido pela Devex SA, que é um programa para controle do tráfego de equipamentos em operações mineiras, incluindo o despacho de caminhões para frentes de lavra, britadores, etc. O monitoramento é feito por meio da instalação de computadores de bordo munidos de GPS (Global Positioning System), sensores e dispositivos de comunicação em cada equipamento móvel (caminhões, escavadeiras e etc). No entanto, mesmo fazendo uso da ferramenta de despacho, nota-se em diversos momentos a baixa produtividade da mina.

Este estudo compreende três frentes de lavras denominadas por A, B e C com distância média de transporte até o ponto de basculamento igual a 8,4km, 8,2km e 8,4km respectivamente. A meta de produtividade adotada pela empresa é de 2.000 toneladas/hora.

IV. INDICADORES CHAVE DE DESEMPENHO

Os Indicadores Chaves de Desempenho (ICD) são variáveis críticas mensuráveis utilizados por todos os gerentes e supervisores da operação de mina no monitoramento de processos em relação a metas estabelecidas [8]. Os ICDs permitem identificar o perfil de perdas do processo, sendo fundamental na determinação de ações que visem maximizar a eficiência do sistema produtivo.

Dentre os diversos indicadores chaves de desempenho

existentes, os seguintes indicadores foram adotados como entrada do sistema fuzzy proposto, baseado no conhecimento e expertise dos operadores da mina: filas de carregamento, filas de basculamento, tempo de ciclo e tempo de carregamento. A seguir, cada um destes indicadores será analisado.

A. Fila de carregamento

A fila de carregamento ocorre quando vários caminhões aguardam nas frentes de lavra para carregar o minério. A existência de filas grandes significa falha no processo e redução da produtividade da mina. A Fig. 2 apresenta as horas gastas em fila no carregamento e a meta a seguir para o mês de Outubro de 2011 na mina em estudo. Nota-se que na maioria dos dias do mês as horas gastas em fila de carregamento estiveram acima da meta.

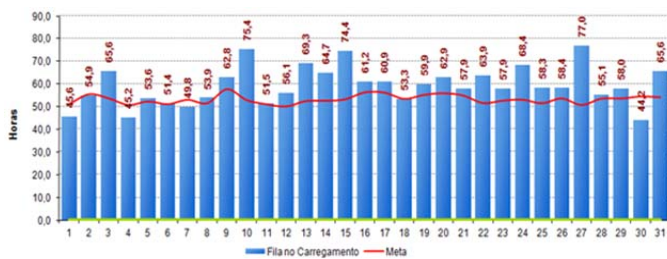


Figura 2. Horas de filas no carregamento. Fonte: Smartmine (2011).

B. Fila de basculamento

A fila de basculamento ocorre quando vários caminhões aguardam no britador para bascular o minério. A Fig. 3 mostra um tempo elevado gasto em fila de basculamento durante todo o mês de Outubro de 2011 na mina em estudo.

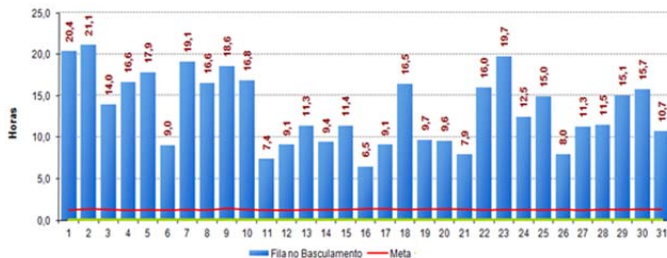


Figura 3. Horas de filas no basculamento. Fonte: Smartmine (2011).

C. Tempo de ciclo

De acordo com os dados coletados na mina, as três frentes de lavras em estudo A, B e C apresentam distância média de transporte até o ponto de basculamento igual a 8,4km, 8,2km e 8,4km respectivamente. A distância média de transporte difere para cada frente de lavra devido a sua localização física na mina, sendo umas mais próximas do ponto de basculamento do que outras. Consequentemente, o tempo de ciclo médio também será diferente para cada uma das frentes de lavra.

Além disso, os tempos de ciclos podem variar devido a outros fatores como o desempenho de cada operador de caminhão (alguns operam dentro do limite de velocidade e outros operam abaixo do limite permitido). Outro fator relevante é a diversidade climática, pois em períodos chuvosos o terreno fica mais liso e escorregadio, sendo necessário

reduzir a velocidade dos caminhões, aumentando consequentemente o tempo de ciclo. A tabela I apresenta os tempos de ciclos médios coletados no mês de Maio/2011 (período de chuva) e no mês de Julho/2011 (período seco). Nota-se que o período de Julho apresenta menor tempo de ciclo em todas as frentes, o que afetará a produtividade da mina.

TABELA I. TEMPOS DE CICLO MÉDIOS REFERENTES AO MÊS DE MAIO/2011.

Frente de Lavra	Tempo de Ciclo em minutos	
	Maio/2011	Julho/2011
A	22,24	21,70
B	21,40	19,84
C	25,23	22,19

D. Tempo de carregamento

O tempo de carregamento depende de várias condições que influenciam na eficiência do carregamento. Como exemplo pode-se citar a condição da frente de lavra, pois o material mal fragmentado, com blocos grandes, tem o efeito de dificultar o enchimento do caminhão aumentando o tempo gasto no carregamento. O tempo de carregamento depende também da altura da bancada. Bancadas baixas reduzem a eficiência durante o enchimento, aumentando o tempo necessário para o carregamento. Além disso, o tempo de carregamento varia de operador para operador conforme a agilidade de cada um.

V. LÓGICA FUZZY

A Lógica Fuzzy pode ser utilizada para traduzir informações imprecisas em termos matemáticos, expressas por um conjunto de regras linguísticas. Desta forma, é possível tratar dados vagos ou imprecisos. O resultado é um sistema de inferência baseado em regras.

O projeto de sistemas fuzzy é baseado na lógica fuzzy e seus principais elementos como mostra a Fig. 4, podendo ser sintetizados da seguinte forma [11,16]:

- Fuzzificador: responsável pelo mapeamento das entradas numéricas em conjuntos fuzzy, variáveis linguísticas.
- Base de regras: consiste de uma seleção de regras do tipo Se – Então, geralmente fornecidas por especialistas no sistema ou extraídas de dados numéricos.
- Inferência fuzzy: é realizada mapeando-se valores linguísticos (conjuntos fuzzy) de entrada em valores linguísticos de saída com o uso das regras.
- Defuzzificador: produz uma saída precisa para o sistema fuzzy a partir do conjunto fuzzy de saída.
- Realização de testes para a verificação do sistema, ajustando os detalhes de acordo com a resposta que se deseja obter.

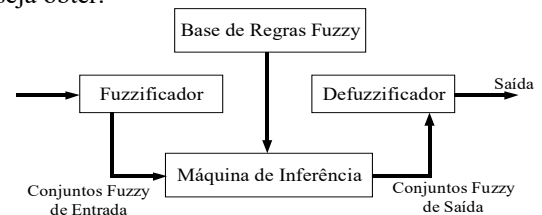


Figura 4. Configuração de sistemas fuzzy com fuzzificador e defuzzificador.

VI. METODOLOGIA PROPOSTA

O método proposto consiste na utilização da lógica fuzzy para estimação da produtividade visando o auxílio ao diagnóstico do processo de extração de minério em minas a céu aberto. A Fig. 5 apresenta o método proposto. As variáveis de entrada utilizadas são: fila de carregamento, fila de basculamento, tempo de ciclo e tempo de carregamento. A variável de saída é a produtividade da mina dada em toneladas/hora. A partir da produtividade estimada, faz-se uma análise na base de regras, obtendo o diagnóstico das horas improdutivas, identificando quais variáveis de entrada são responsáveis pela baixa produtividade da mina.

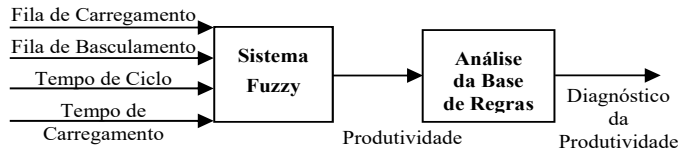


Figura 5. Sistema Fuzzy Proposto.

O sistema de inferência foi baseado no Método Mandani e em todos os casos utilizou-se a função de pertinência do tipo triangular por sua simplicidade de representação [9]. As funções de pertinência utilizadas para cada entrada e saída são apresentadas nas Figs. 6, 7, 8, 9, 10, 11 e 12. As variáveis de entrada utilizam os termos linguísticos Muito Pequeno (MP), Pequeno (P), Médio (M) e Alto (A), e a variável de saída produtividade utiliza os termos linguísticos Muito Baixo (MB), Baixo (B), Médio (M) e Alto (A). A construção das funções de pertinência e regras lógicas baseou-se nas informações e procedimentos estabelecidos pela empresa e na experiência do especialista. A ferramenta utilizada foi Matlab 7.6.

O modelo proposto considera a produtividade das três frentes de lavras A, B e C, e a produtividade hora (t/h) total da mina é dada pela soma da produtividade de cada frente. Além disso, foi necessário realizar a coleta de diversos dados envolvidos nas operações da mina, relativos a produtividade da mina e o tempo de duração de diversas atividades. O software utilizado pela empresa na qual foi realizado o estudo gera relatórios gráficos e numéricos. Esses relatórios possuem um banco de dados com opções detalhadas para consulta por dia, turno, turma e por hora, proporcionando o controle tanto dos atrasos operacionais como da produtividade real da mina.

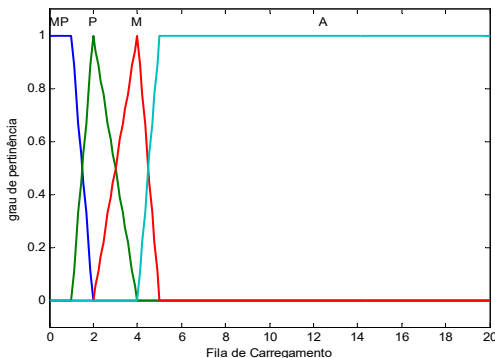


Figura 6. Função de pertinência fila de carregamento.

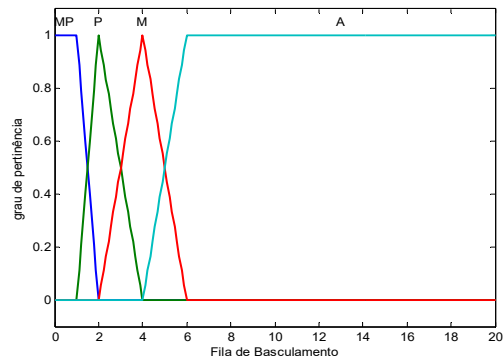


Figura 7. Função de pertinência fila de basculamento.

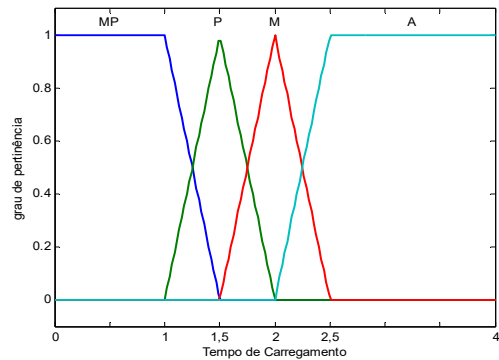


Figura 8. Função de pertinência fila Tempo de carregamento.

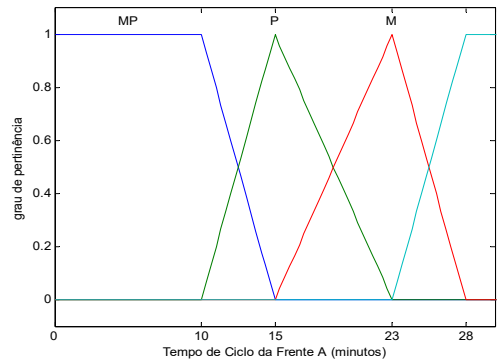


Figura 9. Função de pertinência tempo de ciclo (frente A).

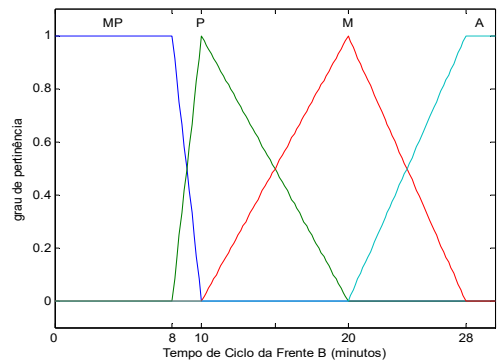


Figura 10. Função de pertinência tempo de ciclo (frente B).

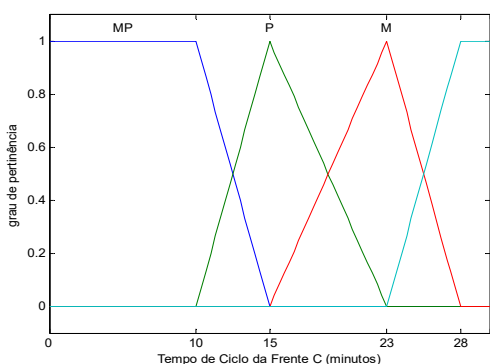


Figura 11. Função de pertinência tempo de ciclo (frente C).

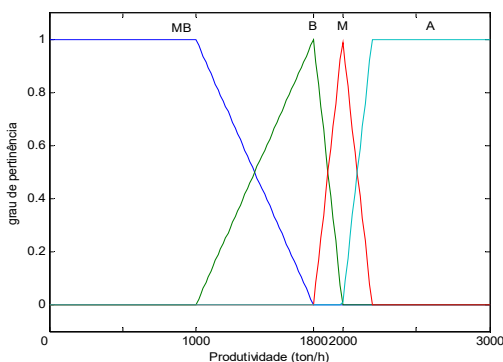


Figura 12. Função de pertinência produtividade.

VII. RESULTADOS

O modelo proposto foi testado com base nos dados fornecidos pela empresa responsável pela mina em estudo. Apesar de diversos dias terem sido analisados, os resultados aqui apresentados referem-se apenas às 24 horas do dia 19 de Outubro de 2011. A gerência de operação de lavra da empresa apresenta uma escala cujos horários são diferenciados e subdivididos em quatro turmas. A escala é feita por turno com três turmas em atividade e uma turma de folga. A turma 1 trabalha das 1:00hs até 5:00hs, a turma 2 das 6:00hs até 14:00hs e a turma 3 das 15:00hs até 24:00hs.

A Tabela 2 apresenta os valores de produtividade média realizada na mina e estimada pelo modelo fuzzy proposto por turma. Os resultados mostram um erro entre a produtividade média realizada e a estimada pelo modelo. No entanto, este trabalho tem por objetivo efetuar uma análise qualitativa da produtividade, e não quantitativa, sendo assim, os erros numéricos obtidos são aceitáveis visto que a classificação da produtividade foi feita corretamente pelo modelo para todos os horários (Muito Baixa, Baixa, Média e Alta).

TABELA II. PRODUTIVIDADE MÉDIA REALIZADA E ESTIMADA PELO MODELO.

	Prod. média realizada	Prod. média estimada	Taxa de acerto da classificação da prod.
Turma 1	858,8	1079,6	100%
Turma 2	498,22	801,33	100%
Turma 3	551,00	758,60	100%

A Fig. 13 apresenta a produtividade estimada para todas as horas do dia, por turma. Nota-se que, em todas as horas do dia, a meta de 2.000 ton/hora não foi atingida por nenhuma turma, tendo a turma 3 o pior desempenho.

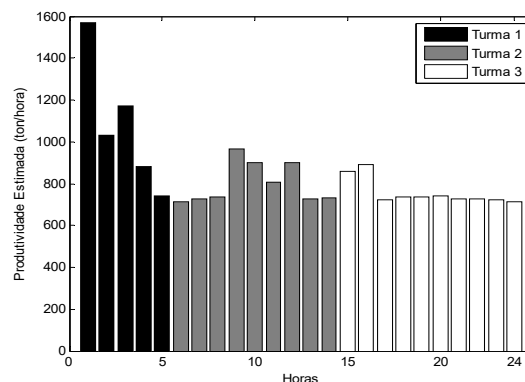


Figura 13. Produtividade estimada pelo modelo.

A partir da produtividade estimada, buscou-se o diagnóstico verificando para as horas em que a mina estava operando com baixa produtividade, quais variáveis de entrada tinham maior impacto na produtividade da mina através da análise da base de regras. Assim, a aplicação do método proposto permitiu identificar os problemas responsáveis pelo aumento de horas improdutivas na mina, os quais são descritos a seguir.

- Apropriação indevida de códigos;

Através dos resultados observou-se um número elevado de caminhões em filas de carregamento, sendo que alguns casos apresentavam valores fora do padrão. Como exemplo pode-se citar o registro de 29 caminhões em fila de carregamento na frente A na 3a hora do dia. Para validar estes dados foi feita a comparação dos mesmos com o total de códigos de fila apropriados pelos operadores na hora referida. Observou-se que há uma diferença significativa nos dados, resultantes da apropriação indevida de códigos pelos operadores. A apropriação indevida de códigos ocorre porque o operador do caminhão precisa alterar imediatamente seu estado, apropriando o código corretamente no computador de bordo de acordo com a atividade que a máquina de carga está executando. Caso contrário, o sistema identificará filas inexistentes. Estes erros de apropriação indevida de códigos também ocorrem em diversos horários nas três frentes em análise.

- Problemas no semáforo e fim de turno;

Pode-se verificar que a formação de filas no basculamento ocorre, principalmente, por problemas no semáforo do britador. Os caminhões ficam esperando abrir o sinal verde para efetuar o basculamento, o qual por não funcionar devidamente, congela o sinal e não autoriza o basculamento. Em situações como essa, o controlador do despacho deverá desviar ou realocar o caminhão para a pilha. Nota-se também que no final do turno há um fluxo maior na fila de basculamento com a chegada quase simultânea dos caminhões na área da britagem. Isso ocorre porque os operadores se

“programam” antes do término do turno, geralmente diminuindo a velocidade, para chegar ao britador, com tempo suficiente para bascular, chegar ao pátio de estacionamento e efetuar a troca de turno.

- Áreas de sombra;

Além da pluviometria, outras situações foram identificadas como causadoras de aumento no tempo de ciclo, como a grande quantidade de áreas de sombra (áreas em que há perda de sinal). Isto dificulta a transmissão de dados dos equipamentos e com isso o sistema de despacho não funciona de modo otimizado.

- Equipamentos sem sistema automatizado;

A análise dos dados permitiu verificar que estes apresentam inconsistência na maioria dos horários para as três frentes de lavra. Como exemplo pode-se citar o registro da operação de uma escavadeira que operou 90 minutos no intervalo de 60 minutos. Essa inconsistência nos dados deve-se a alguns equipamentos não terem o sistema automatizado, fato que exige dos operadores o preenchimento manual de suas atividades em uma planilha. No entanto, com essas anotações manuais perde-se a eficiência no controle desses dados, pois o operador poderá subestimar esses códigos e horários pela dificuldade de, simultaneamente, ter que carregar o caminhão, verificar os horários e preencher a planilha. Quando o sistema não é automatizado o operador pode apropriar um código na planilha sem estar executando essa atividade, como por exemplo, estar parado com o código de fila de carregamento.

A partir da identificação dos principais problemas responsáveis pelo aumento de horas improdutivas na mina, pode-se propor para a empresa o seguinte plano de ação:

- Treinamento dos operadores destacando a importância da apropriação correta dos códigos.
- Treinamento dos controladores de despacho para realocação de caminhões quando nas alterações do ciclo operacional.
- Verificar periodicamente as antenas de transmissão de sinal dos equipamentos do sistema de despacho eliminando áreas de sombra.
- Implantação de equipamentos automatizados, de modo que o operador não tenha que preencher os códigos da atividade que está sendo executada manualmente.

VIII. CONCLUSÃO

A metodologia proposta neste trabalho permite a estimação da produtividade em uma mina a céu aberto, servindo também como ferramenta de auxílio ao diagnóstico das horas improdutivas detectadas na mina através do estudo das relações existentes entre diversas variáveis e a produtividade da mina.

Os resultados mostram que o modelo proposto é capaz de estimar a produtividade da mina, classificando-a corretamente em Muito Baixa, Baixa, Média ou Alta. Além disso, foi possível identificar os principais problemas responsáveis pela baixa produtividade na mina em análise como: mau funcionamento do semáforo no britador e comportamento indevido dos operadores no fim de seus turnos ocasionando filas no basculamento, áreas de sombra que ocasionam

aumento no tempo de ciclo, além da utilização de equipamentos não automatizados e a apropriação indevida de códigos pelos operadores, fazendo com que o despacho de caminhões não funcione de forma ótima, afetando a produtividade da mina.

A identificação destes problemas permite estabelecer na empresa ações de planejamento que visam o aumento da produtividade da mina, como o treinamento adequado de operadores, eliminação de áreas de sombra na mina e a implantação de equipamentos automatizados. Espera-se que estas ações de custo relativamente baixo, depois de implantadas na empresa, possam reduzir os custos operacionais aumentando a produtividade da mina.

REFERÊNCIAS

- [1] Y. Qing-Xia, Computer simulation of drill-rig/shovel operations in open-pit mines, *Proceedings of Winter Simulation Conference*, pp. 463-468, 1982.
- [2] L. F. Rodrigues, L. R. Pinto, Análise comparativa de metodologias utilizadas no despacho de caminhões em minas a céu aberto, *REM - Revista Escola de Minas*, Vol. 65, pp. 377-384, 2012.
- [3] S. K. Palei, N. C. Karmakar, P. Paliwal, B. Schimm, Optimization of Productivity with surface miner using conveyor loading and truck dispatch system, *International Journal of Research in Engineering and Technology*, Vol. 2, pp. 393-396, 2013.
- [4] M. J. F. Souza, I. M. Coelho, S. Ribas, H. G. Santos, L. H. C. Merschmann, A hybrid heuristic algorithm for the open-pit-mining operational planning problem, *European Journal of Operational Research*, Vol. 207, pp. 1041-1051, 2010.
- [5] G. P. Júnior, M. J. F. Souza, I. E. Cabral, Uma nova formulação de programação matemática para o problema de planejamento de lavra, *Gestão da Produção, Operações e Sistemas*, Vol. 4, pp. 125-137, 2009.
- [6] R. F. Subtil, D. M. Silva, J. C. Alves, A Practical Approach to Truck Dispatch for Open Pit Mines, *35th APCOM Symposium*, pp. 765-777, Wollongong, 2011.
- [7] M. F. Meyer, Análise de cenários envolvendo operações de carregamento e transporte em uma mina a céu aberto utilizando simulação. Dissertação de Mestrado, Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, 2002.
- [8] R. Brandão e G. de Tomi, Metodologia para estimativa e gestão da produtividade de lavra, *Revista Escola de Minas*, Vol. 64, No. 1, pp. 77-83, 2011.
- [9] M. X. He, J. C. Wei, X. M. Lu, B. X. Huang, The Genetic Algorithm for Truck Dispatching Problems in Surface Mine, *Information Technology Journal*, Vol. 9, pp. 710-714, 2010.
- [10] E. B. Pinto, Despacho de caminhões em mineração usando lógica nebulosa visando ao atendimento simultâneo de políticas excludentes. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.
- [11] L. X. Wang, *A Course in Fuzzy Systems and Control*, Prentice-Hall International Inc, 1997.
- [12] J. A. Meech, “The evolution of intelligent systems in the mining industry”, *Proceedings of Mineral Process Modeling, Simulation and Control Conference*, 2006.
- [13] L. H. C. Merschmann e L. R. Pinto, “Planejamento operacional da lavra de mina usando modelos matemáticos”, *Revista Escola de Minas*, Vol. 54, No. 3, pp. 211-214, 2001.
- [14] B. G. Zhang, “Dispatching algorithm in open-pit mine truck dispatching system”, *Metallurgy Mining*, Vol. 315, pp. 35-38, 2002.
- [15] S. Alarie and M. Gamache, “Overview of Solution Strategies Used in Truck Dispatching Systems for Open Pit Mines”, *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, Vol. 16, No.1, pp. 59-76, 2002.
- [16] J. M. Mendel, “Fuzzy Logic Systems for Engineering: a Tutorial”. *Proc. IEEE*, Vol. 83, pp. 345-377, 1995.



Maria Daniely B. Silva obteve o título de mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará (UFPA), Belém, Pará, Brasil, em 2012. Atualmente trabalha na área de despacho da Hydro Mineração Paragominas S.A.



Kássia Cristina S. Cavalcante concluiu o curso de Licenciatura Plena em Matemática pela Universidade do Estadual do Pará (UEPA), Paragominas, Pará, Brasil, em 2008. Atualmente é aluna do curso de mestrado profissional de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará (UFPA), Belém, Pará, Brasil. Trabalha na área de despacho da Hydro Mineração Paragominas S.A.



Carolina M. Affonso obteve o título de mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, Santa Catarina, Brasil em 1999. Em 2004 recebeu o título de doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, São Paulo, Brasil. Atualmente é professora do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará (UFPA). Suas principais áreas de pesquisas são: Planejamento e Otimização de Sistemas de Potência, Estabilidade de Tensão e Geração Distribuída.



Francisco Eduardo L. Picanço concluiu o curso de graduação em Geologia no ano de 2000 pela Universidade Federal do Pará (UFPA), Belém, Pará, Brasil. Atualmente trabalha na área de despacho da Hydro Mineração Paragominas S.A.