

Dimensionamento de Frota no Transporte de Estéril por Simulação Dinâmica

Marcos V. A. F. Silva^{***} Elvio C. O. Evangelista^{***}
Rafael A. Barbosa^{***} Thomás V. B. Pinto^{**} Luciano P. Cota^{**}
Thiago A. M. Euzébio^{**}

^{*} Departamento de Engenharia de Controle e Automação, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, MG, Brasil (e-mail: marcos.alves1@aluno.ufop.edu.br).

^{**} Instituto Tecnológico Vale - ITV, Ouro Preto, MG, Brasil (e-mail: thomas.pinto@itv.org, luciano.p.cota@itv.org, thiago.euzebio@itv.org)

^{***} Vale S.A. (e-mail: elvio.evangelista@vale.com, rafael.araujo.barbosa@vale.com)

Abstract: Dynamic simulations have been applied in the industry as a support tool for decision-making and operational adjustments. The present work presents a study of fleet sizing for the transport of waste rock from the Brucutu mine, Vale S.A. Real information from the mine was used to develop a dynamic simulator that would represent the physical aspects, availability, and productivity of the equipment that make up the circuit. The simulation results defined a fleet configuration capable of meeting the operation's requirements and improving the equipment occupancy rate.

Resumo: Simulações dinâmicas têm sido aplicadas na indústria como ferramenta de suporte na tomada de decisões e ajustes operacionais. O presente trabalho apresenta um estudo de dimensionamento de frota para o transporte de estéril da mina de Brucutu, Vale S.A. Foram utilizadas informações reais da mina para desenvolver um simulador dinâmico que representasse aspectos físicos, disponibilidade e produtividade dos equipamentos que compõem o circuito. Os resultados das simulações definiram uma configuração de frota capaz de atender os requisitos da operação e aprimorar a taxa de ocupação dos equipamentos.

Keywords: Mining; Loading and Transportation; Fleet Sizing; Vehicles Traffic; Dynamic Simulation.

Palavras-chaves: Mineração; Carregamento e Transporte; Dimensionamento de Frota; Tráfego de Veículos; Simulação Dinâmica.

1. INTRODUÇÃO

Na mineração, a operação de carregamento e transporte consiste na movimentação do material carregado na frente de lavra em direção a um destino específico. Esta atividade normalmente é composta pelo conjunto caminhão e carregadeira, que representam 50% a 60% dos custos de operação em minas a céu aberto (Mambo, 2017). Dessa forma, o correto dimensionamento de frota nesta etapa da operação é de grande relevância (Silva, 2009).

Um método eficiente para verificar o comportamento de processos é a simulação computacional, que pode ser definida como uma ferramenta de apoio a tomadas de decisão, possibilitando uma melhor visualização do sistema real em um ambiente virtual (Steffen and Cassel, 2005). Com a simulação, torna-se possível executar diferentes cenários de um mesmo sistema e avaliar os efeitos positivos e negativos das mudanças realizadas.

A simulação pode ser classificada em estática ou dinâmica. Em grande parte das mineradoras, o método convencional é o estático. Contudo, esta metodologia, quando aplicada

em sistemas de alta complexidade, pode acarretar na tomada de decisões erradas, já que não considera alterações de tempo nos eventos. Logo, a variação de dados como a disponibilidade física dos equipamentos e a ocorrência de um sistema de filas, não são mostrados por este tipo de simulação.

Neste artigo, é desenvolvido um simulador dinâmico da rota de estéril, que inicia na frente de lavra, passa por uma etapa de britagem e termina em uma pilha de deposição de estéril e rejeito (PDER). Os dados e premissas utilizadas são de uma mina de minério de ferro em Minas Gerais. O objetivo é o de analisar se a frota de pás carregadeiras e caminhões está adequada para carregar toda a demanda anual de estéril. Duas soluções são avaliadas: *i*) frota dimensionada pelo método clássico e *ii*) frota proposta neste trabalho em consequência dos resultados da simulação dinâmica.

As seções deste trabalho estão organizadas da seguinte forma: na Seção 2, é apresentada uma revisão bibliográfica de artigos científicos publicados na área de simulação dinâmica; na Seção 3, é detalhado o funcionamento da

planta de britagem de estéril; na Seção 4, são descritos os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento da simulação; na Seção 5, são mostrados os resultados para os cenários simulados e, por fim, na Seção 6 são apresentadas as conclusões do trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A simulação dinâmica tem sido uma solução para analisar diversas cadeias de suprimentos, como minas, pilhas de estocagem, transporte e portos (Cremonese, 2014). Com o intuito de avaliar alterações nos sistemas de controle de uma usina de britagem, Albuquerque et al. (2019) desenvolveram um simulador dinâmico. Nesse caso, o simulador é ligado ao sistema de automação real da usina em um modo *hardware-in-the-loop*. Resultados mostraram que a proposta obteve uma redução na variabilidade no nível dos silos e um aumento de produtividade na usina.

Para verificar o desempenho da usina de concentração de minérios de ferro da Samarco Mineração S.A., em Minas Gerais, Carvalho (2003) simulou diferentes cenários de operação. Os cenários se diferenciam de acordo com a disponibilidade física dos equipamentos, o aumento na capacidade da flotação e do tempo entre falhas dos recursos. De acordo com os resultados, a simulação dinâmica indicou a flotação como principal gargalo da usina e, ainda, determinou em qual etapa atuar de forma a aumentar a capacidade de todo o processo.

Como ferramenta para análise de confiabilidade, Miranda et al. (2016) realizaram a simulação dinâmica de uma planta de beneficiamento de minério de ferro da Vale S.A. O objetivo era avaliar como as paradas não-programadas influenciavam na produção do circuito. Ao final do estudo, a simulação permitiu identificar os principais gargalos e observar o desempenho dos britadores de acordo com a entrada de canga ou hematita.

Santos et al. (2020) desenvolveram um sistema de suporte a decisão baseado em *simheuristic* para encontrar o valor ótimo de equipamentos ligados em um circuito de britagem. Essa solução utiliza de um simulador dinâmico de um circuito de britagem completo para avaliar a melhor solução. Cenários industriais reais são utilizados para demonstrar a eficácia da proposta. Resultados mostraram um aumento de produtividade ao mesmo passo que reduziu o consumo energético.

Em Juliá (2010), foi elaborado um modelo de simulação dinâmica para aumentar a capacidade de produção de um sistema integrado pátio-porto da Samarco Mineração S.A., no Espírito Santo. Com a simulação, foi possível estabelecer quais mudanças devem ser realizadas no pátio de estocagem e no sistema portuário, de forma a atingir a nova capacidade.

Nas áreas de carregamento e transporte de material das indústrias, a simulação dinâmica vem sendo aplicada para a seleção da quantidade de equipamentos e tamanho de frotas de veículos. Mambo (2017) realizou uma simulação dinâmica destas áreas em uma mina de carvão à céu aberto, em Moçambique. Os resultados mostraram o número de máquinas de cargas, caminhões e pontos de descarga, necessários para incrementar a produção e reduzir as filas do circuito. De maneira análoga, Gonçalves (2019)

desenvolveu modelos de simulação para as atividades de decapeamento e lavra de uma mina em Juruti pertencente à Alcoa, no Pará. O trabalho afirma que a simulação auxiliou na previsão do tempo necessário para a realização das atividades de decapeamento e lavra, através da análise da variação do número de caminhões e da formação de filas.

3. O CIRCUITO DE BRITAGEM

O circuito simulado neste trabalho representa a planta de britagem de estéril da Mina de Brucutu da Vale S.A. em São Gonçalo do Rio Abaixo, MG. A Figura 1 ilustra o circuito a partir do estéril obtido na mina.

Na etapa de lavra, juntamente com o minério é extraído o estéril, que é um mineral que não possui valor econômico agregado, devido ao seu baixo teor de ferro. Por este motivo, o estéril não é processado na usina de beneficiamento, sendo apenas submetido à etapa de britagem para a redução da sua granulometria e posterior empilhamento em pilhas. Logo, no circuito simulado o estéril extraído da mina é transportado por caminhões na rota inicial e basculado na moega. O dimensionamento da moega é um aspecto importante a ser considerado, pois, se mal dimensionada, pode haver a formação de uma fila de caminhões no pátio de basculamento e, ainda, a entrega reduzida de material às etapas seguintes do circuito.

O alimentador localizado abaixo da moega extrai o material e o leva para a grelha vibratória. O *oversize* da grelha alimenta a etapa de britagem, composta por 1 britador giratório, 1 britador de rolos primários e 1 britador hidrocônico, enquanto que o *undersize* é transportado juntamente com o produto oriundo do alimentador para o transportador de correia de longa distância (TCLD). Como tanto a peneira vibratória quanto os britadores entregam uma taxa regular de material e possuem uma alta eficiência, na simulação estes equipamentos foram considerados como um único objeto da etapa de britagem.

Ao final do TCLD, há uma empilhadeira, responsável por agrupar o material e formar a pilha intermediária. Esta pilha possui um volume máximo de 105.000 t, que permite aos caminhões do trecho final continuar operando mesmo após uma parada da empilhadeira. Em seguida, o estéril agregado na pilha é retomado por pás carregadeiras que abastecem os caminhões. As máquinas de carga são equipamentos fundamentais para que a quantidade de material prevista pela equipe de engenharia, seja entregue à PDER. Além disso, o uso de um número baixo de pás, além de causar a formação de fila no pátio de carregamento, contribui para a condição de transbordo da pilha.

Após serem carregados, os caminhões transportam o material e o empilham na PDER Tamanduá, destino final do produto.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização da simulação dinâmica do circuito de britagem foi utilizado o *software* de simulação de tráfego SUMO (*Simulation of Urban MObility*) em conjunto com o código Python. O *software* Eclipse SUMO é um pacote de simulação, de código aberto e gratuito, para modelagem de sistemas de tráfego - incluindo veículos, pedestres,

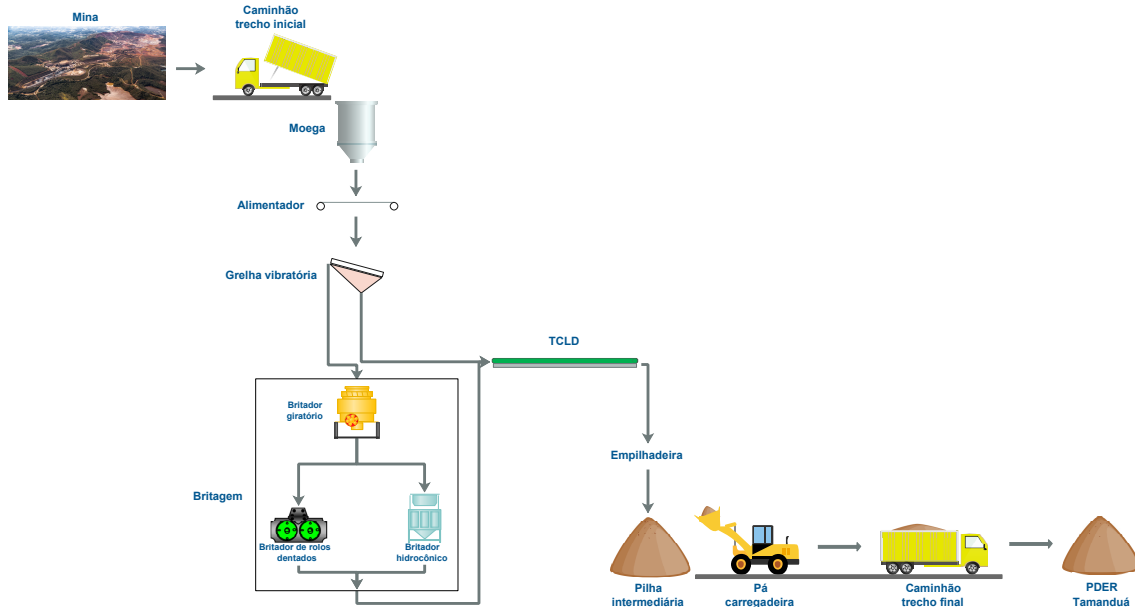


Figura 1. Fluxograma da britagem de estéril da Mina de Brucutu

sinalizações, pontos de carga e descarga (Lopez et al., 2018).

A interação com o Python foi feita através de um protocolo denominado TraCI (*Traffic Control Interface*), onde o SUMO adota o paradigma cliente-servidor, executando ambos os aplicativos de forma síncrona. Dessa forma, o usuário pode solicitar atributos de veículos, semáforos e vias, além de alterar dinamicamente características da simulação.

Tanto a rota inicial, que interliga a mina à moega, quanto o trajeto final, responsável pelo acesso da pilha intermediária à PDER, foram construídos através da inserção das estradas, veículos e pontos de carga e descarga do material, utilizando o *software* SUMO. As rotinas de código implementadas no Python, são responsáveis por definir características como capacidade, taxa de alimentação, velocidade, condições de intertravamento e indisponibilidade física dos equipamentos e caminhões.

A moega possui um volume máximo de 434 t e é bloqueada caso esteja preenchida com 50% ou mais da sua capacidade total. Os demais equipamentos da etapa de britagem, operam de acordo com a taxa de alimentação definida para cada um deles.

A pilha intermediária inicia a simulação com 50% da sua capacidade total, equivalente a 52.500 t de estéril. Quando a sua capacidade máxima é atingida, a pilha deixa de receber material da empilhadeira, até que o seu nível de retorno alto de 80% seja alcançado. De maneira similar, caso esteja vazia, as máquinas de carga são bloqueadas e impedidas de retirar o estéril, até que a pilha seja preenchida e alcance o nível de retorno baixo de 5%. De acordo com a equipe de engenharia, o objetivo é que os caminhões que retiram material desta pilha entreguem uma massa anual de aproximadamente 19,2 Mt à PDER.

Todas as máquinas da etapa de carregamento e transporte possuem um índice de indisponibilidade física, fornecido pela equipe de engenharia. A função deste dado é determi-

nar os instantes de tempo nos quais os equipamentos estão em manutenção e permitir ao ambiente virtual simulado reproduzir de maneira mais realista o comportamento do circuito. No que se refere aos equipamentos da atividade de carregamento e transporte, os caminhões do trecho inicial possuem uma indisponibilidade física de 16,67% enquanto as máquinas de carga 1 e 2 juntamente com a frota do trecho final possuem 8,33%. A terceira pá carregadeira, quando utilizada, fica indisponível 54,17% do tempo total simulado. O intuito é que este equipamento não seja de uso exclusivo do circuito de britagem de estéril e esteja disponível para outras operações na mina.

5. RESULTADOS SIMULADOS

Os resultados do trabalho são subdivididos em três subseções. A primeira delas consiste nos resultados da simulação dinâmica para o cenário 424, termo adotado para designar 4 caminhões no trecho inicial, 2 pás carregadeiras na pilha intermediária e 4 caminhões no trecho final. Esta configuração foi inicialmente proposta pela equipe de engenharia após análise por simulação estática, que é um método difundido na rotina operacional. Com isso, o intuito é analisar, por meio da simulação dinâmica, qual o comportamento desse cenário quando levado à prática. Em seguida, são apresentados os resultados da simulação dinâmica para o cenário 534, que, de forma análoga ao cenário anterior, adotou esta nomenclatura por atribuir 5 caminhões no trecho inicial, 3 pás carregadeiras na pilha intermediária e 4 caminhões no trecho final. Este formato é a solução proposta pelos autores. Por fim, é feita uma análise comparativa entre as taxas de ocupação das configurações analisadas. Para todos os cenários, a simulação foi executada cinco vezes, considerando um tempo de ciclo de 720 horas, ou seja, 30 dias de operação.

5.1 Cenário 424

Na Figura 2, apresenta-se a variação da quantidade de material na pilha intermediária durante todo um ciclo

de operação. Neste cenário, a pilha teve um acréscimo de estéril ao longo do tempo e finalizou a simulação com aproximadamente 93.200 t. Ressalta-se que, com esta tendência de subida, em algum instante a pilha deve atingir a sua capacidade máxima, implicando em um intertravamento por nível alto e paralisando toda a atividade de britagem de estéril. Ainda, devido ao seu grande volume de trabalho, esta pilha demanda uma grande área operacional.

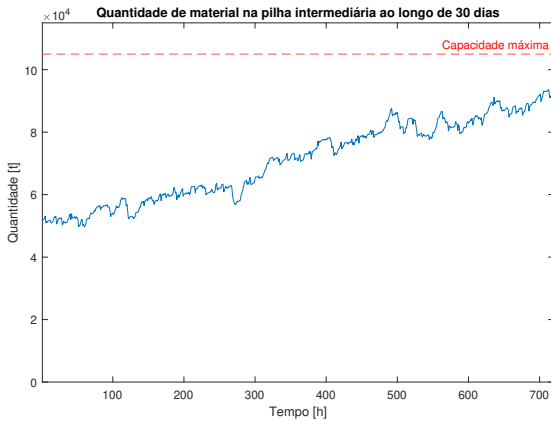


Figura 2. Quantidade de material na pilha intermediária ao longo da simulação

As médias das taxas de material enviadas à pilha intermediária e à PDER, podem ser visualizadas na Tabela 1. Nota-se que, a diferença entre estas taxas é de aproximadamente 53 t, o que justifica a tendência de subida da pilha, apresentada na Figura 2. Além disso, com a utilização de apenas duas máquinas de carga na pilha intermediária para abastecer os caminhões, há a formação de fila no pátio de carregamento. Desse modo, a quantidade de estéril enviada ao destino final não atingiu a massa anual de 19,2 Mt, valor previsto de produção de estéril pela mina.

Tabela 1. Média das taxas de material enviadas às pilhas

	Enviada à pilha intermediária	Enviada à PDER
Taxa (t/h)	2.105,02	2.052,10
Taxa (t/a)	18.439.975,20	17.976.396,00

Portanto, diante das análises feitas no cenário 424, um redimensionamento de frota, que diminua o tempo de espera em fila e permita aos caminhões uma maior retirada de material da pilha intermediária, pode ser adotado.

5.2 Cenário 534

O cenário 534 propõe uma maior retirada de estéril da pilha intermediária, com o intuito de enviar à PDER uma massa anual igual ou superior a 19,2 Mt. A Figura 3 mostra a variação da quantidade de material na pilha intermediária ao longo dos 30 dias. Depois de alcançada as primeiras 186 horas, a pilha atingiu o seu nível zero, ou seja, há uma tendência de queda para esta configuração. Em seguida, a pilha operou majoritariamente entre o intervalo de 0 t a aproximadamente 6000 t, ocupando uma pequena área do pátio de operação. Logo, a inserção da

terceira máquina de carga permitiu uma maior retirada de material à medida que reduziu o tempo de espera em fila dos caminhões.

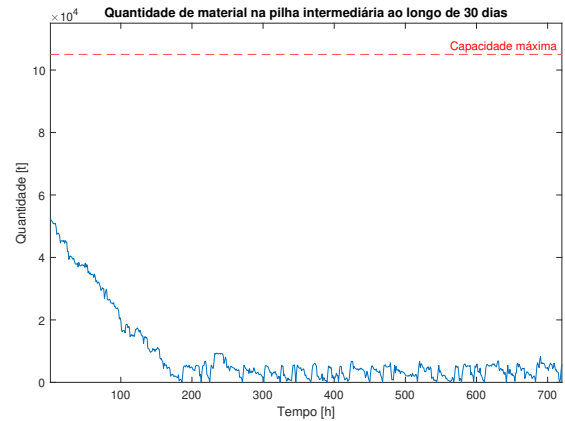


Figura 3. Quantidade de material na pilha intermediária ao longo da simulação

Na Tabela 2, apresentam-se as médias das taxas de material enviada à pilha intermediária e à PDER.

Tabela 2. Média das taxas de material enviadas às pilhas

	Enviada à pilha intermediária	Enviada à PDER
Taxa (t/h)	2.184,60	2.254,75
Taxa (t/a)	19.137.096,00	19.751.610,00

Conforme a Tabela 2, com o cenário proposto é possível enviar à PDER uma massa anual de aproximadamente 19,7 Mt, atendendo a uma das premissas adotadas.

5.3 Comparativo

Nesta subseção, realizam-se duas análises comparativas entre os cenários simulados, sendo a primeira delas relacionada com o tempo de ocupação dos equipamentos de britagem e carregamento e a segunda com o tempo de ocupação da frota de caminhões no trecho final. Para as taxas de ocupação dos equipamentos de britagem e carregamento, apresentadas na Figura 4, consideram-se os instantes nos quais estes estão operando, com indisponibilidade física e ociosos.

A partir das simulações realizadas, com exceção das pás carregadeiras, há um acréscimo de 2,49% no tempo médio de operação do cenário 534 com relação à configuração 424, justificado pela inserção do quinto caminhão na frota do trecho inicial, que permite à instalação de transporte operar durante um maior intervalo de tempo. Em relação ao tempo médio de ociosidade, que retrata os momentos nos quais o equipamento está disponível mas não operando, para os equipamentos que antecedem a pilha intermediária, há uma redução de 2,49% entre os cenários estudados. Ressalta-se que na última configuração apresentada, as pás carregadeiras 1 e 2 possuem um tempo ocioso de 7,15%, resultado dos instantes em que a pilha intermediária permanece entre o seu limite inferior e 5% da sua capacidade, impedindo a retirada de material.

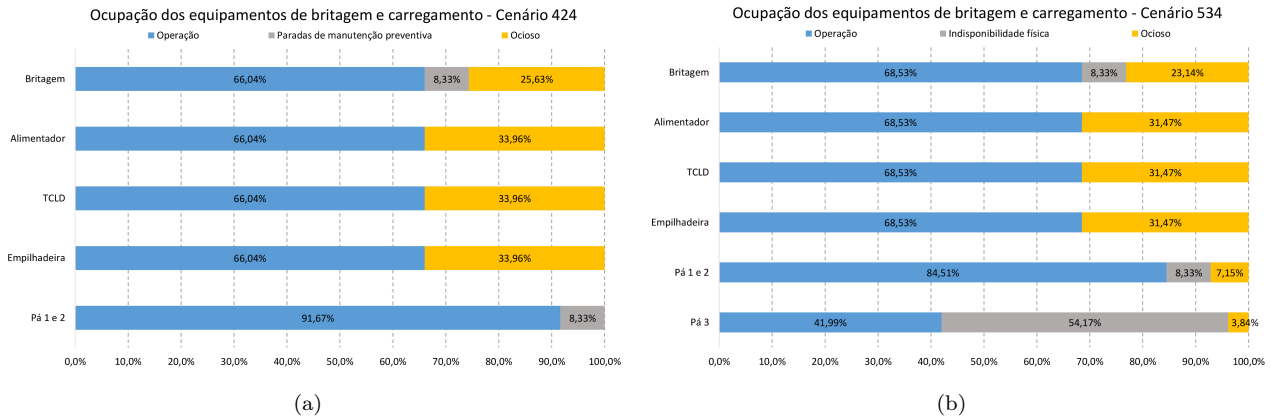


Figura 4. Ocupação dos equipamentos de britagem e carregamento para (a) cenário 424 e (b) cenário 534.

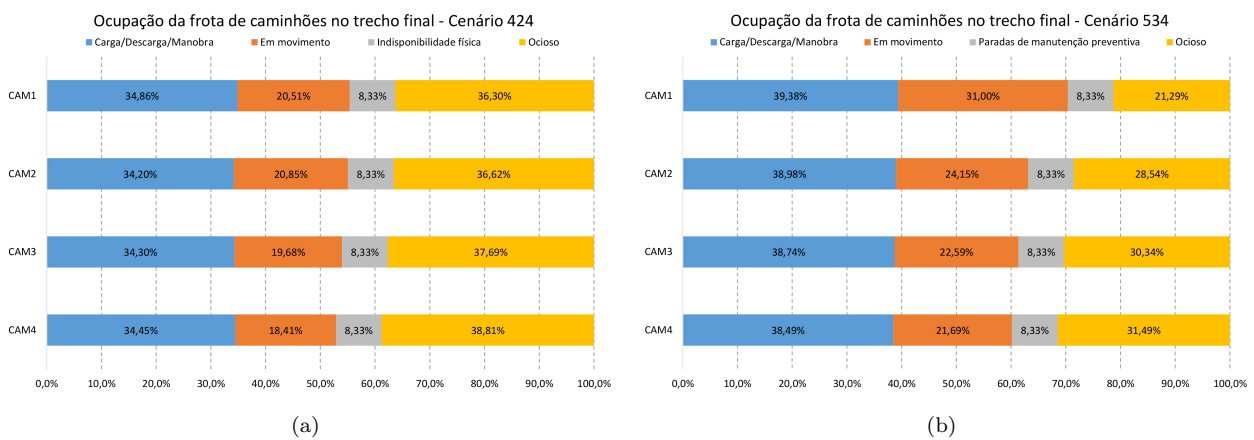


Figura 5. Ocupação da frota de caminhões no trecho final para (a) cenário 424 e (b) cenário 534.

Na Figura 5, apresenta-se a análise das taxas de ocupação da frota de caminhões no trecho final, que foram subdivididas em quatro tópicos. O primeiro rótulo, de carga, descarga e manobra, é a junção dos períodos de tempo em que os caminhões carregam no pátio de carga, manobram e basculam na PDER. O segundo e terceiro item são os tempos nos quais os caminhões estavam percorrendo o trajeto entre a pilha intermediária e a PDER; e a indisponibilidade física da frota, respectivamente. Por fim, no tempo ocioso são considerados os instantes nos quais os caminhões estiveram parados em filas de carregamento e basculamento.

Conforme visto na Figura 5, com o acréscimo da terceira máquina de carga na pilha intermediária, a frota de caminhões no trecho final teve um acréscimo de 4,44% no tempo médio de carga, descarga e manobra. Além disso, o aumento da retirada de material nesta pilha, possibilitou aos caminhões realizar o ciclo de carga e descarga frequentemente, justificando o crescimento de 4,99% no tempo médio em que estes veículos estão em movimento. Para o tempo ocioso, há uma redução média de 9,44% entre as configurações propostas, devido ao aumento dos tempos médios de operação e movimento da frota já apresentados anteriormente. Com isso, percebe-se que a estrutura 534, em comparação com a configuração 424, apresenta melhores resultados, pois reduz o tempo de fila dos caminhões

à medida que envia uma quantidade maior de material à PDER.

6. CONCLUSÃO

Este trabalho abordou a simulação dinâmica de uma planta de britagem de estéril. Duas configurações foram avaliadas, e cada uma delas varia de acordo com a quantidade de pás carregadeiras e caminhões presentes na etapa de carregamento e transporte. O aumento do número de caminhões e máquinas de carga mostrou-se muito eficaz, pois, além de melhorar a eficiência dos equipamentos da etapa de britagem, contribuiu com a redução do tempo de fila dos caminhões em 9,44% e elevou a taxa de estéril anual enviada à PDER em 9,87%. Em trabalhos futuros, deseja-se integrar à simulação dinâmica um algoritmo de otimização baseado em *simheuristic*, que permite modelar os eventos estocásticos do modelo e definir uma frota ótima.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, Brasil (CAPES), Código de Financiamento 001; do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), números 402759/2018-4 e 444425/2018-7; da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas

Gerais (FAPEMIG); do Instituto Tecnológico Vale (ITV); da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) e da Vale S.A.

REFERÊNCIAS

- Albuquerque, K., Silva, H., Teodoro, E., Fonseca, A., Garioli, G., Lopes, Ê., Cota, L., and Euzébio, T. (2019). Averaging level control of bulk solid material using a tripper car. *IFAC-PapersOnLine*, 52(14), 147–152.
- Carvalho, D.D.T.d. (2003). Metodologia de análise do desempenho da usina de concentração da samarco mineração sa baseada em simulação das operações.
- Cremonese, D.T. (2014). *Desenvolvimento e aplicação de metodologia para estudos de simulação dinâmica na cadeia do minério de ferro*. Ph.D. thesis, Universidade de São Paulo.
- Gonçalves, P.G. (2019). Desenvolvimento de modelos de simulação para as atividades de decapeamento e lavra de uma mina de bauxita com o software arena.
- Juliá, A.F. (2010). *Desenvolvimento de um modelo de simulação para dimensionamento de um sistema integrado pátio-porto na cadeia do minério de ferro*. Ph.D. thesis, Universidade de São Paulo.
- Lopez, P.A., Behrisch, M., Bieker-Walz, L., Erdmann, J., Flötteröd, Y.P., Hilbrich, R., Lücken, L., Rummel, J., Wagner, P., and Wießner, E. (2018). Microscopic traffic simulation using sumo. In *The 21st IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems*. IEEE. URL <https://elib.dlr.de/124092/>.
- Mambo, I.F. (2017). Simulação da operação de carregamento e transporte numa mina a céu aberto de carvão.
- Miranda, R., SILVA, K.C., Vieira, M.G., et al. (2016). Simulação dinâmica para análise de confiabilidade de um processo de beneficiamento de minério de ferro. *ABM Week*, 666–671.
- Santos, M.S., Pinto, T.V., Júnior, Ê.L., Cota, L.P., Souza, M.J., and Euzébio, T.A. (2020). Simheuristic-based decision support system for efficiency improvement of an iron ore crusher circuit. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 94, 103789.
- Silva, V. (2009). Carregamento e transporte de rochas. *Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto*, 126.
- Steffen, D.A. and Cassel, R.A. (2005). Relatório final da simulação do abastecimento da tnt no condomínio industrial da general motors (gm). *Canoas: Centro Universitário La Salle*.