

Utilização da simulação para análise da viabilidade de implementação de caminhões autônomos na mineração

Walter Schmidt Felsch Jr., MSc.
Universidade Federal de Ouro Preto, Brasil.
wsfelsch@hotmail.com

A.F. Oliveira
Universidade Federal de Ouro Preto, Brasil.

Carlos Arroyo Ortiz, DSc.
Universidade Federal de Ouro Preto, Brasil.

Nelson Morales, DSc.
Universidad del Chile, Chile.

Resumo

A tecnologia que viabiliza a utilização de equipamentos totalmente autônomos não é uma novidade na indústria mineral. A redução de pessoas expostas a riscos aliado a uma maior utilização da frota de equipamentos são os principais fatores motivacionais das empresas de mineração na busca pela excelência operacional. O atual cenário de isolamento social devido a pandemia, contribui ainda mais para o desenvolvimento de tecnologias que visam o trabalho remoto e automatização das atividades. Um grande desafio para a viabilização dos equipamentos autônomos nas operações mineiras é o desenvolvimento de um estudo confiável que contemple os benefícios operacionais e possibilite buscar o retorno do alto investimento inicial, que atualmente é uma barreira para a sua popularização. A existência de particularidades nas condições operacionais de cada empreendimento mineiro minimiza a possibilidade de utilização e replicação de resultados obtidos em locais que já possuem a tecnologia instalada. Esta pesquisa possui o objetivo de avaliar o desempenho operacional dos equipamentos de mina em diferentes cenários operacionais utilizando a simulação das operações com caminhões autônomos. O estudo foi desenvolvido em uma empresa mineradora de grande porte, localizada na região Sudeste do Brasil e possui potencial para replicação da metodologia em outras empresas. O desenvolvimento da pesquisa foi viabilizado pela utilização do software de simulação de eventos discretos DSIM, com o estudo de dois cenários operacionais que contemplam caminhões autônomos. Foram avaliados os impactos relacionados com as atividades de reestruturação da mina, que precedem a implementação da tecnologia de equipamentos autônomos. A pesquisa proporcionou a quantificação de resultados, como o aumento da produtividade e utilização efetiva das frotas de equipamentos de carga e transporte. Estes índices são essenciais para a composição do estudo técnico-financeiro de viabilidade da tecnologia autônoma na mineração.

Abstract

The technology that enables the use of autonomous trucks is not a novelty in the mineral industry. The reduction of people exposed to risks combined with a better use of the equipment fleet are the main motivational factors of mining companies in the search for operational excellence. The current scenario of social isolation due to the pandemic, contributes even more to the development of technologies aimed at remote work and automation of activities. A major challenge for the feasibility of autonomous equipment in mining operations is the development of a reliable study that takes into account operational benefits and enables the search for a return on the high initial investment, which is currently a barrier to its popularization. The existence of particularities in the operational conditions of each mining company minimizes the possibility of use and replication of results obtained in places that already have the technology installed. This research has the objective of evaluating the operational performance of mine equipment in different operational scenarios using the simulation of operations with autonomous trucks. The study was developed at a large mining company located in the Southeast region of Brazil and has potential for replication of the methodology in other companies. The development of the research was made possible using the tool DSIM, a discrete event simulation software, through the study of two operational scenarios that include autonomous trucks. The impacts related to the mine's restructuring activities, which preceded the implementation of the autonomous equipment technology, were evaluated. The research provided the quantification of results, such as increased productivity and effective use of load and haulage equipment

fleets. These indexes are essential for the composition of the technical-financial feasibility study of autonomous technology in mining.

1 - Introdução

As demandas por maior competitividade, associadas à adoção de novas tecnologias e conhecimento, são fatores cada vez mais comuns em empresas e organizações de todos os segmentos. No caso específico da mineração, o aumento da produtividade e a diminuição dos custos são possíveis sempre que novos conhecimentos e técnicas são introduzidos para a execução do trabalho.

Ao mesmo tempo, a segurança torna-se cada vez mais primordial frente às operações de mineração. Nesse cenário, há oportunidades de expandir a automação para as operações mais críticas e valiosas para a indústria de mineração.

A automação está relacionada a operações onde a interferência humana é mínima ou não está presente, sendo assim processos mais estáveis, seguros e contínuos. A automação nas operações de mina pode oferecer o controle de operações a uma distância segura através de câmeras, joysticks e no caso do transporte de materiais, operações com equipamentos autônomos onde recursos computacionais controlam os equipamentos através de softwares especializados. O benefício mais relevante seria a retirada de pessoas de áreas potenciais de risco na mineração.

Na área de operações mineiras, as operações unitárias com maior potencial para automatização são a perfuração, o carregamento e o transporte. Sobre a operação de transporte, Rivera (2014) estima que o ganho de produtividade para operações autônomas pode chegar a 20% e os ganhos de utilização dos equipamentos estão entre 10-20%. Para o mesmo autor, a expectativa é que o uso de caminhões autônomos também reduza os custos operacionais e prolongue a vida útil de alguns componentes, como pneus, sistema de frenagem e também a redução do consumo de combustível e emissões de CO₂.

Além dos ganhos de segurança, operação e manutenção, a automação do sistema de transporte também reduz as perdas associadas aos fatores humanos, sobrepondo a variabilidade relacionada ao tipo de condução de cada operador, paradas devido troca de turno, refeição e absenteísmo. Dessa forma, a operação se torna mais contínua, estável e segura.

Para Fritschy & Spinler (2019), os caminhões autônomos podem ter vantagens com relação à economia de combustível e fatores ambientais. Segundo os autores, o custo total de propriedade será menor devido a maior eficiência relacionada ao consumo de combustível e da redução custos com manutenção. Além disso, espera-se que os caminhões autônomos tenham maior ecoeficiência, pois estão programados para serem eficientes no consumo de combustível, que mitiga as emissões de CO₂ e economiza custos de combustível (Merfeld et al., 2019).

Muitos parâmetros podem afetar a eficiência da frota na mineração a céu aberto, tais como: planejamento e *layout* da mina; velocidade, carga média e tempo de ciclo; desgaste dos pneus e resistência ao rolamento; idade e manutenção dos veículos; projeto de estoques e pilhas de estéril; tempo ocioso; parâmetros de funcionamento do motor e padrões de mudança de transmissão (Australian Gov, 2010; Curi et al., 2013).

A seleção de equipamentos de transporte na mineração é baseada nos seguintes critérios: Compatibilidade com equipamentos de carregamento; disponibilidade financeira e datas de entrega; taxa de produtividade compatível com o plano de mina; geometria da cava e rotas de transporte (Baloo (2008); Curi et al., (2013).

Empresas mineradoras que possuem problemas em seu design estrutural, condição dos acessos inadequadas, excesso de cruzamentos e elevado número de carros e equipamentos auxiliares trafegando na mina, provavelmente não vão conseguir obter os ganhos indicados nos projetos iniciais de implantação da tecnologia de caminhões autônomos. Faz-se necessário uma análise

prévia das condições de mina para maximizar o desempenho dos equipamentos, evitando paradas desnecessárias. Segundo Elgharbawy et al. (2018), a condução automatizada depende da percepção do ambiente operacional do caminhão. Possíveis violações de segurança podem ser causadas por restrições do sistema devido a limitações físicas ou técnicas das funcionalidades pretendidas.

Para prever resultados futuros, é importante buscar o conhecimento das limitações dos sistemas de transporte autônomos e quanto podem se aproximar ou exceder a um sistema tradicional. Como resultado, os softwares de simulação podem ser usados para ajudar a prever KPIs com benchmarking, bem como descobrir novos KPIs que podem ser melhores utilizados na medição de mudanças futuras com novas tecnologias.

O conhecimento sobre o posicionamento e a velocidade do veículo (especialmente em relação a outros veículos) pode prevenir acidentes e reduzir o custo de manutenção e substituição de componentes. Embora os equipamentos autônomos não estejam imunes a avarias, o aumento da consistência e a manutenção programada podem melhorar a vida útil dos componentes dos equipamentos, levando a queda de custos associados à manutenção. A perda de produção pode ser minimizada ou eliminada, pois a frequência de falhas não previstas também pode diminuir (Bennink, 2008).

O sistema de transporte autônomo tem um custo relativamente alto, por este motivo é necessário realizar um estudo completo de viabilidade financeira a fim de verificar a eficácia desses equipamentos em cada empreendimento mineiro.

2 - Contexto tecnológico

A simulação é uma ferramenta útil e versátil para analisar, através de recursos computacionais, o comportamento de sistemas complexos que envolvem diversas variáveis. Prado (2014) afirma que “a simulação é a técnica de solução de um problema pela análise de um modelo que descreve o comportamento do sistema usando um computador digital”. Na mesma linha de raciocínio, Cassandras & Lafortune (2010) diz que o termo simulação pode ser entendido como o processo de projetar e criar um modelo computadorizado do sistema real ou proposto, com objetivo de conduzir experimentos numéricos para prover melhor entendimento do comportamento do sistema para um dado conjunto de condições.

Para Sakura & Miyake (2009), a simulação de eventos discretos abrange o estudo de modelos de simulação cujas variáveis mudam de estado instantaneamente em pontos específicos de tempo, em contraste ao que ocorre com modelos contínuos, cujas variáveis podem mudar de estado continuamente no decorrer do tempo.

Segundo Parreira (2013), a frota de transporte convencional pode ser adaptada a um sistema operacional autônomo. No entanto, é necessário o investimento em uma rede sem fio adequada, mapeamento digital da mina.

Caminhões com tecnologia autônoma são equipados com sistemas GPS de alta precisão, assim é possível rastrear sua posição em tempo real e realizar o seu gerenciamento a partir de uma sala de controle. Eles também são equipados com sistemas de comunicação sem fio, que permitem um fluxo contínuo de informações com a sala de controle. Os equipamentos possuem sensores de detecção de obstáculos, permitindo a detecção da presença de outros equipamentos e pessoas que trabalham ao seu redor. Estes sensores possuem uma regra inserida na programação software, onde quando ativados podem desacelerar ou até mesmo parar o equipamento completamente (Rivera, 2014).

Com a ajuda de softwares de simulação, os autores Pereira e Meech (2012) aplicaram a simulação numa mina a céu aberto com objetivo de comparar alguns indicadores de desempenho entre sistema

de caminhões autônomos e caminhões convencionais; Tan et al.(2012), desenvolveram e aplicaram um modelo de otimização-simulação computacional para apoiar na gestão de operações numa mina a céu aberto de cobre; e Guimarães et al.(2007), desenvolveram um modelo de simulação computacional com objetivo de validar resultados obtidos pela aplicação de um modelo de programação matemática para alocação dinâmica de caminhões com atendimento de metas de qualidade e de produção em minas a céu aberto.

A tecnologia utilizada pelos fabricantes de equipamentos autônomos utiliza sensores de presença e projeção de posicionamento, além de analisar as informações do sistema de telemetria embarcada. Ocorrências como o alto índice de frenagem, variação da pressão entre as suspensões e alta resistência ao rolamento podem causar redução de velocidade e até mesmo a parada dos equipamentos.

O trabalho de adequação destes parâmetros de mina é fundamental para maximização dos futuros resultados da implantação do projeto de mina autônoma.

3 - Materiais e Métodos

Os dados utilizados para a realização desta pesquisa foram extraídos do banco de dados do sistema de gerenciamento de frotas utilizado pela empresa alvo deste estudo. Os dados enviados pelos equipamentos da mina são armazenados em um servidor dedicado, possibilitando a realização de consultas frequentes desenvolvidas em linguagem SQL com objetivo de geração de informações confiáveis.

O software utilizado para realizar as simulações foi o Delphos Open Pit Simulator © (DSIM), que é uma ferramenta de simulação de eventos discretos, desenvolvida pelo Centro Tecnológico Avançado de Mineração (AMTC) da Universidade do Chile. O DSIM pode estimar a produção de um plano de lavra a partir de três elementos básicos: layout da mina (topografia, frentes de lavra e rotas); frota de equipamentos de carga e transporte; e o plano de produção detalhado.

3.1 – Validação de dados no simulador

O primeiro cenário foi a validação da ferramenta de simulação, inserindo informações reais de um dia de operação da mina alvo do estudo no DSIM. Foram inseridas no software as seguintes variáveis: plano de produção detalhado por origem e destino; perdas operacionais (motivos de paradas dos equipamentos); MTBF; MTTR; velocidade média; distribuições de valores dos tempos de carregamento, tempo de basculamento e tempo de fila. Para o dia considerado na simulação, o layout da mina consistiu em 9 frentes de lavra e 12 destinos, entre eles 2 britadores e 1 estoque. A topografia e as rotas utilizadas são mostradas na Figura 1. Além desses pontos, o *layout* também incluiu um estacionamento.

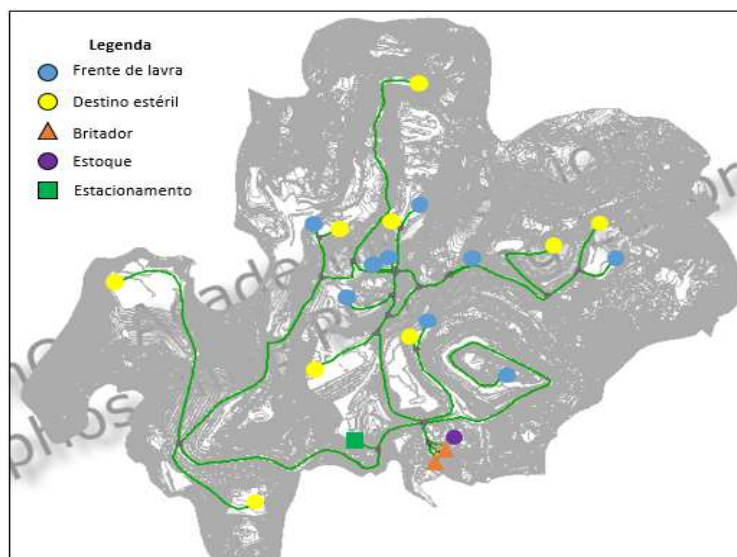


Figura 1 – Mapa topográfico da mina com os trajetos utilizados

Foram realizadas 100 réplicas na Simulação 1 e os seus resultados podem ser identificados na figura 2 e tabela 1. Os desvios identificados nos indicadores massa movimentada e horas trabalhadas na frota de transporte se mostraram satisfatórios e representativos. O modelo foi validado e a partir dele foram estipulados dois cenários de simulação que serão comparados com o cenário inicial.

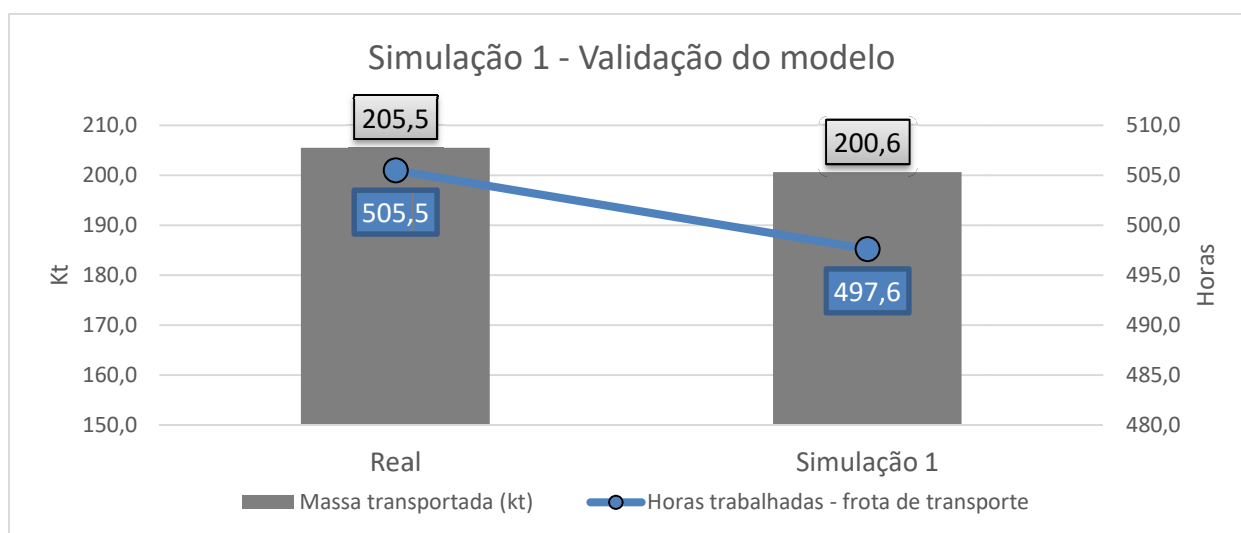


Figura 2 – Comparativo entre os dados reais e o resultado da simulação 1

A tabela 1 mostra o resultado dos desvios identificados entre as informações reais e simuladas dos indicadores massa movimentada (kt) e Horas de operação. Estes desvios ocorrem devido a inserção de informações da distribuição estatística de dados no software.

Tabela1 – Resultado da Simulação 1 e Validação do modelo

Indicador	Δ (1/real)
Massa transportada (t)	-2,4%
Horas trabalhadas - frota de transporte	-1,6%

3.2 – Simulação 2: Preparação da mina para viabilização da operação de caminhões autônomos

A implantação de projetos que propõem a utilização de equipamentos autônomos nas empresas envolvem vários parâmetros de controle, por esse motivo, é necessário antecipar possíveis problemas ou adversidades que a tecnologia pode causar. Um exemplo desta condição seriam as paradas desnecessárias de equipamentos. Estas paradas podem ocorrer em situações onde a tecnologia identifica riscos aos equipamentos que trafegam na mina e ao próprio equipamento. A falta de preparação das condições adequadas de trafegabilidade podem comprometer os resultados esperados do projeto e gerar perdas operacionais. Os principais fatores a serem analisados no início do projeto são:

- Largura de praças de carregamento;
- Construção, dimensionamento e manutenção de vias de acesso;
- Trevos e cruzamentos;
- Impacto de equipamentos auxiliares na mina (tratores, motoniveladoras, caminhonetes);
- Plano de drenagem;
- Intervenções operacionais (deslocamentos, controle de qualidade, desmonte, topografia,...)

Estes fatores podem acusar anomalias nos sensores e gerar redução na velocidade média dos caminhões ou até mesmo a interrupção completa da sua atividade.

A simulação 2 consiste no cenário de melhorias operacionais a serem realizadas na mina decorrentes do processo de implantação da tecnologia autônoma, que impactam diretamente na velocidade média da frota. A variável velocidade média foi utilizada como parâmetro de análise das futuras melhorias implementadas no *layout* da mina alvo do estudo. O valor da velocidade média simulada no software foi alterado para o valor da velocidade referente ao seu 3º quartil. Este valor foi considerado após a realização de análises estatísticas de velocidade média por trecho e também por um teste prático, onde um trecho da mina foi ajustado para condições consideradas ótimas relacionadas ao *layout* da mina. A tabela 2, abaixo, ilustra os valores da velocidade média que foram utilizados para a realização da Simulação 2.

Tabela 2 – Análise da velocidade média por perfil de transporte

Velocidade Média						
	Caminhão Vazio			Caminhão Cheio		
	Descendo	Horizontal	Subindo	Descendo	Horizontal	Subindo
Velocidade média (km/h)	25,26	26,75	25,02	16,98	17,83	15,23
Velocidade 3º quartil (km/h)	29,13	30,85	28,85	19,35	20,32	17,35
% operadores 3º quartil	12,39%			15,31%		

Pode-se verificar na tabela 2, a representatividade dos operadores que praticam a velocidade simulada através do 3º quartil. Além das melhorias nas condições de mina citadas, o treinamento dos operadores possui grande importância para o alavancamento dos resultados.

3.3 – Simulação 3: Operação utilizando caminhões autônomos

Dentre os benefícios operacionais oriundos da utilização de caminhões autônomos nas empresas, se destaca a redução de horas de paradas dos equipamentos. Este período inoperante pode ser alterado para horas de caminhões operando, proporcionando o aumento da utilização efetiva da frota de transporte. Ações rotineiras como trocas de turno e refeições possuem grande impacto no número de horas improdutivas dos equipamentos e podem ser extintas em sua totalidade.

A operação autônoma foi inserida no simulador através da exclusão de paradas operacionais dos caminhões que possuem relação direta com a atividade de operadores. Os motivos de parada que foram alterados foram: Troca de turno; Refeição; Falta de operador; Cerração; Reunião; Inspeção;

Deslocamento do operador; Parada para necessidades fisiológicas; Operador com sono. Estas paradas operacionais foram substituídas por horas de operação dos caminhões.

Para a simulação 3, também foi utilizado o cenário com velocidades médias estipuladas pelo 3º quartil.

4 - Resultados

Os resultados das três simulações realizadas podem ser verificados na figura 3. Os resultados se baseiam na comparação de cenários referentes a um dia de operação (24 horas) na mina alvo do estudo. A simulação 2 resultou em um aumento de 5% na massa movimentada e redução de 4% na utilização efetiva de equipamentos de transporte. Já a simulação 3 se mostrou 16% mais produtiva, com aumento de 6% na utilização efetiva dos caminhões.

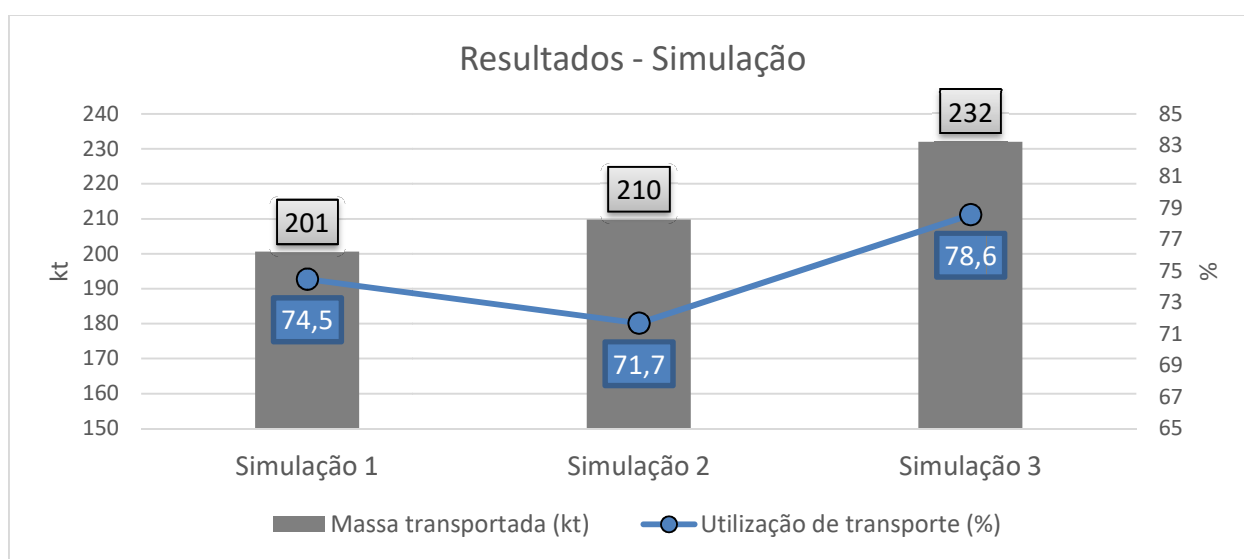


Figura 3 – Resultado final da simulação

Os resultados referentes aos equipamentos de transporte podem ser verificados na figura 4. O indicador “filas” aumenta conforme o número de horas de operação dos equipamentos de transporte se eleva. Este fator pode significar a existência de superdimensionamento da frota (excesso de caminhões utilizados na operação), com possibilidade de redução da frota de transporte. Este efeito relacionado às filas também pode ser verificado na produtividade de transporte. O indicador aumenta 6% na simulação 2, porém reduz 2% na comparação com cenário autônomo (simulação 3), influenciado pelo aumento das filas.

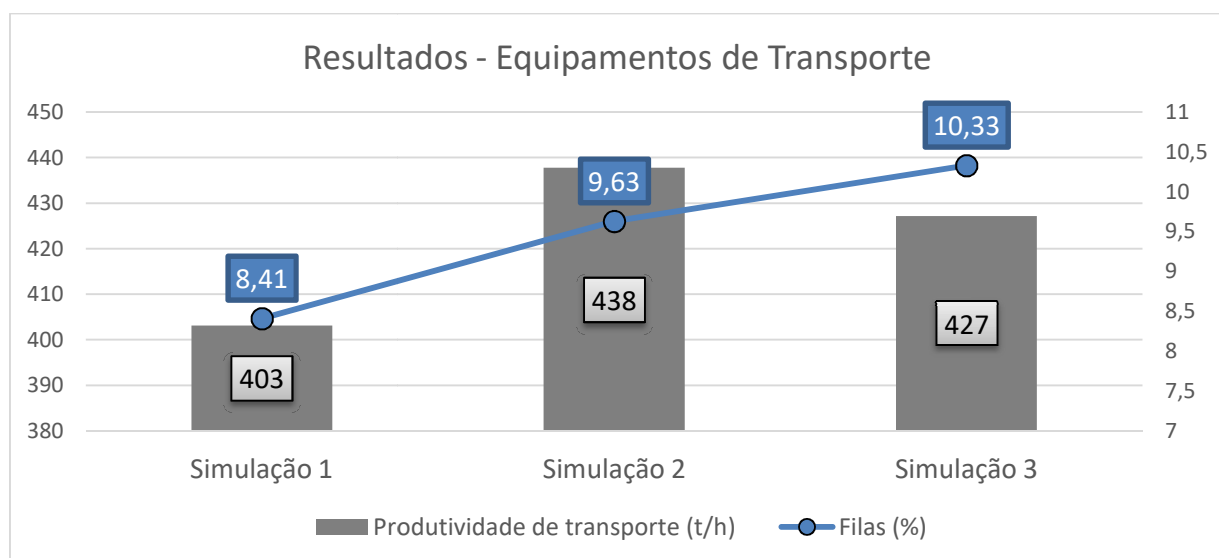


Figura 4 – Resultado da Simulação referente a equipamentos de transporte

A análise referente a operação de carregamento se inicia com o aumento da produtividade dos equipamentos em 25%, comparando a simulação 3 com a simulação 1, conforme verificado na figura 5. Este resultado pode significar que a atual operação, caracterizada pela simulação 1, possui excesso de equipamentos de carga disponíveis ou a que a operação de transporte possui baixa eficiência, já que os cenários caracterizados pelas simulações 2 e 3 a ociosidade reduz 8% e 31% respectivamente. A utilização do carregamento aumenta 17% influenciada pelo aumento da eficiência da operação de transporte.

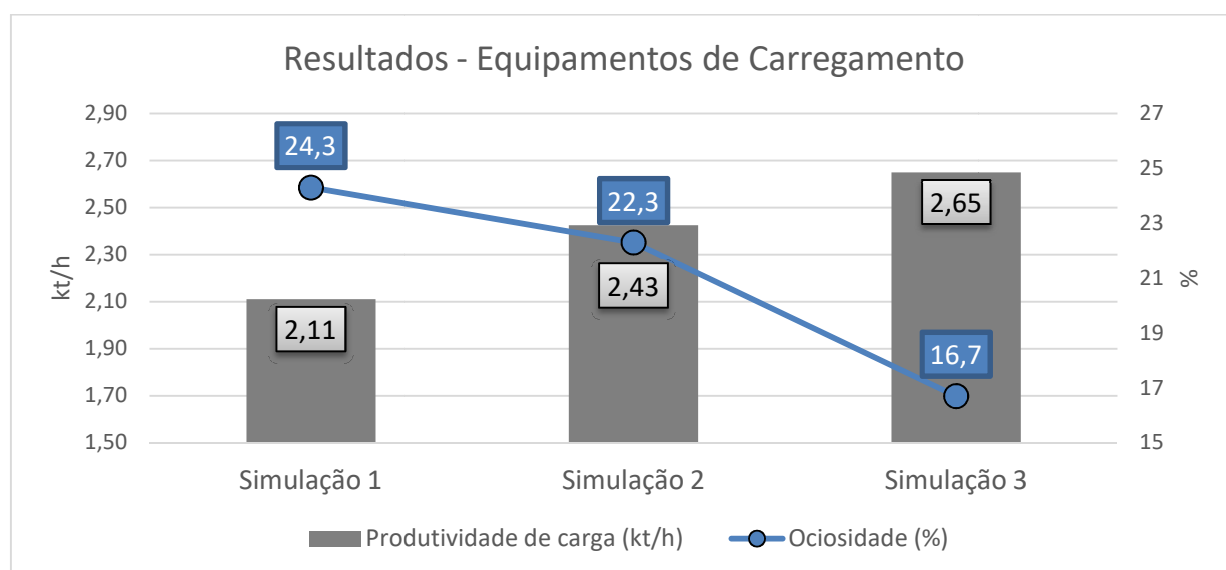


Figura 5 – Resultado da Simulação referente a equipamento de carregamento

A tabela 3, abaixo, ilustra o resultado final das três simulações, e também a comparação dos resultados entre os cenários simulados.

Tabela 3 – Resultado geral da simulação com destaque para os comparativos entre os cenários

Resultados - Simulação				Δ (%)		
	Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3	Δ (2/1)	Δ (3/1)	Δ (3/2)
Massa transportada (t)	200.588	209.799	232.068	5%	16%	11%
Produtividade de transporte (t/h)	403	438	427	9%	6%	-2%

Utilização de Transporte (%)	74,5	71,7	78,6	-4%	6%	10%
Tempo de fila (%)	8,41	9,63	10,33	15%	23%	7%
Produtividade de carga (t/h)	2.111	2.425	2.649	15%	25%	9%
Utilização de carga (%)	55,7	63,3	65	14%	17%	3%
Ociosidade no carregamento (%)	24,3	22,3	16,7	-8%	-31%	-25%

5 – Discussão

A maximização dos resultados decorrentes da implantação da tecnologia autônoma, demanda alguns ajustes em procedimentos operacionais e padronizações de projetos no layout das minerações, como largura de praças e acessos, trevos e cruzamentos de veículos, locais de paradas operacionais e número de equipamentos auxiliares que trafegam concomitantemente com os equipamentos de produção.

A execução das melhorias estruturais nas minas com objetivo de adequação ao recebimento dos equipamentos autônomos deve ser considerado como um pré-requisito. Os benefícios operacionais referentes a estas melhorias não devem ser analisados juntamente com os ganhos operacionais da tecnologia autônoma. Como boa prática operacional, a antecipação desta etapa pode acelerar os projetos de viabilização da implantação de equipamentos autônomos.

A utilização de equipamentos autônomos na mineração também possui um tema complexo para discussão, que seria a redução de mão de obra necessária para a execução das atividades, principalmente para motoristas e operadores de caminhões. O advento de novas tecnologias proporciona a redução de determinadas atividades, porém novas oportunidades surgem com outros propósitos, como análise avançada de dados. Cabe as empresas e as comunidades o consenso sobre o reaproveitamento da mão de obra e treinamentos de novas funções.

6 – Conclusão

Devido aos avanços tecnológicos e sua incorporação no setor mineral, o estudo da automação de sistemas de transporte em minas a céu aberto é muito relevante.

Os resultados demonstraram ganhos expressivos relacionados ao aumento de produtividade e utilização de equipamentos de mina. Outro ponto de grande importância é a possibilidade de redução do número de equipamentos dimensionados para execução do plano de produção.

As simulações realizadas identificaram duas abordagens distintas. A primeira é referenciada pelos ganhos obtidos por adequações nos procedimentos operacionais e *layout* da mina. A segunda abordagem se refere aos ganhos com a implementação de equipamentos autônomos em sua operação. Conforme demonstrado nos resultados, cada uma das duas abordagens possui os seus benefícios de maneira particular.

O principal benefício da tecnologia é a eliminação de atividades manuais e acidentes que são originados da distração e fadiga dos operadores. O valor econômico do sistema também é maximizado devido à redução de custos de manutenção, pois os equipamentos são utilizados de maneira mais consistente e são melhor gerenciados sob o controle do software.

Cada projeto de mina possui variáveis exclusivas, como condições climáticas e geotécnicas, tipos de material, porte de equipamentos, volume de produção, entre outros. Como resultado, diferentes pontos de ajuste são necessários para cada projeto. Faz-se necessária uma análise técnico-econômica de cada site, de maneira a viabilizar a implantação de sistemas autônomos de transporte.

Referências Bibliográficas

- AUSTRALIAN GOVERNMENT. 2010. Department of Resources, Energy and Tourism, Analyses of Diesel for mine haul and transport operations, A case study, Australia, 2010.
- BALOO, D.T. 2008. Equipment selection at Tenke Fungurume Mining. Proceedings of Seventeenth International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection, Beijing, China, pg 269-278, Ed. Univ. Laval/Int.Journal of Mining, Rec. Env.
- BENNINK, C. 2008. Trucks & transportation - take steps to cut vehicle fuel costs; a proactive approach can add up to major savings. Equipment Today, 44(6).
- CASSANDRAS, C. & LAFORTUNE, S. 2010. Introduction to Discrete System. 2^a edição.
- CATTERPILAR. Cat Autonomous trucks Haul 1b Tonnes. Available < <http://www.mining.com/web/cat-autonomous-trucks-haul-1b-tonnes/>>. Access in: 21 nov. 2018.
- CURI, A., FELSCH JR., W. S., MEIRELES., B.P., RODOVALHO, E. C. 2013. Evaluation of Haul Trucks Performance in a CSN Mine. International Conference on Mine Planning and Equipment Selection. MPES 2013. Dresden, Germany.
- DELPHOS. DSIM Manual Open Pit v1.2. 2016. Available: < <http://delphoslab.cl/index.php/software-es/manuales/99-dsim-open-pit>>. Access in: 10 jul. 2018.
- ELGHARBAWY, M., SCHERHAUFER, I., OBERHOLLENZER, K., FREY, M., & GAUTERIN, F. (2018). Adaptive functional testing for autonomous trucks. International Journal of Transportation Science and Technology. doi:10.1016/j.ijtst.2018.11.003.
- FRITSCHY, C., & SPINLER, S. (2019). The impact of autonomous trucks on business models in the automotive and logistics industry—a Delphi-based scenario study. Technological Forecasting and Social Change, 148, 119736. doi:10.1016/j.techfore.2019.119736
- GUIMARÃES, I. F.; SOUZA, M. J. F.; e PANTUZA JR, G. 2007. Modelo de simulação computacional para validação dos resultados de alocação dinâmica de caminhões com atendimento de metas de qualidade e de produção em minas a céu aberto. XIV Simpósio de Engenharia de Produção (SIMPEP).
- HUCKA, V. J., TU, J. H. 1985. Analysis of open pit truck haulage system by use of a computer model. CIM bulletin, 78:879, p. 53-59.
- KOMATSU. Komatsu Celebrates 10th Anniversary of Commercial Deployment of AHS. Available < [http://www.komatsu.com.au/AboutKomatsu/NewsAndPublications/News/Pages/Komatsu-celebrates-10th-anniversary-of-commercial-deployment-of-Autonomous-Haulage-System-\(AHS\).aspx](http://www.komatsu.com.au/AboutKomatsu/NewsAndPublications/News/Pages/Komatsu-celebrates-10th-anniversary-of-commercial-deployment-of-Autonomous-Haulage-System-(AHS).aspx)>. Access in: 21 nov. 2018.
- MERFELD, K., WILHELMS, M.-P., HENKEL, S., & KREUTZER, K. (2019). Carsharing with shared autonomous vehicles: Uncovering drivers, barriers and future developments – A four-stage Delphi study. Technological Forecasting and Social Change, 144, 66–81. doi:10.1016/j.techfore.2019.03.012
- PARREIRA, J. 2013. An Interactive Simulation Model to Compare an Autonomous Haulage Truck System with a Manually-Operated System. 212 p. Published Doctoral Dissertation. The University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada. 2013.

PARREIRA, J.; MEECH, J. 2012. Simulation of an Open Pit Mine to Study Autonomous Haulage Trucks. Norman B. Keevil Institute of Mining Engineering, The University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada, V6T2Z4. 2012.

PRADO, D. 2014. Teoria das Filas e da Simulação, 5ª ed. Nova Lima: Falconi, 2014a.

RIVERA, J. R. M. 2014. Efectos de la Incorporación de Tecnologías Autónomas em el Diseño y la Planificación Minera. Faculdade de Ciências Físicas e Matemáticas, Departamento de Engenharia de Minas, Universidade do Chile, Santiago de Chile, 2014.

SAKURADA, N.; MIYUKE, D. I. 2009. Aplicação de simuladores de eventos discretos no processo de modelagem de sistemas de operações de serviços. 2009. Revista Gestão e Produção, São Carlos, v. 16, n. 1, p. 25-43, jan.-mar.

TAN, Y.; CHINBAT, U.; MIWA, K. TAKAKUMA, S. 2012. Operations Modeling and Analysis of Open Pit Copper Mining Using GPS Tracking Data. Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference.