MARJORIE HUARCAYA GALINDO

Desafios para a integração das informações de planejamento, manutenção e operação em uma mina subterrânea

São Paulo
2019

MARJORIE HUARCAYA GALINDO

Desafios para a integração das informações de planejamento, manutenção e operação em uma mina subterrânea.

Dissertação apresentada ao Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Lavra de Minas

Orientador: Prof. Dr. Giorgio de Tomi

São Paulo
2019

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo,_____de_____de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catalogação-na-publicação

Huarcaya, Marjorie
Desafios para a integração das informações de planejamento, manutenção e operação em uma mina subterrânea / M. Huarcaya -- versão corr. -- São Paulo, 2019.
63 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo.

1.MINERAÇÃO SUBTERRÂNEA (PLANEJAMENTO;OPERAÇÃO;MANUTENÇÃO) 2.OPERAÇÃO COMBINADA I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo II.t.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por sempre estar do meu lado, me dando forças nos momentos difíceis.

Aos meus pais, Ingrid Galindo e Carlos Huarcaya, por terem sido meu suporte emocional durante todo este período.

À minha irmã, Anghiolina Huarcaya, que é minha motivação constante.

Ao Prof. Dr. Giorgio de Tomi, pelas suas orientações e seus ensinamentos constantes durante a elaboração deste trabalho e o período de estudo.

Aos colegas do Núcleo de Pesquisa para a Mineração Responsável da Universidade de São Paulo pelo companheirismo brindado em todo o período.

RESUMO

Esta pesquisa consiste em identificar os principais desafios e os possíveis benefícios relacionados ao desenho e gerenciamento de um sistema que integra informações de produção de uma mina subterrânea (ou seja, planejamento, operação e manutenção). O objetivo é definir as especificações do usuário e medir os benefícios da integração dos processos de produção em termos de redução de custos e competitividade, com uma proposta inovadora que pode ser implementada em minas que já estão em operação. O conceito de integração de processos de produção está sendo usado com sucesso em minas a céu aberto; no entanto, em operações subterrâneas, a aplicação desse conceito está ocorrendo em ritmo mais lento. A previsão dos benefícios esperados do sistema especialista online orientado para minas subterrâneas proposto foi alcançada aplicando simulação dinâmica a uma mina existente em operação. Os resultados incluíram a especificação de um sistema especialista em gerenciamento de minas subterrâneas ideal e os ganhos potenciais em produtividade de minas, que foram superiores a 17%. Este documento contribui para a compreensão do papel dos sistemas especialistas no processo de tomada de decisão envolvido no gerenciamento da produção de minas, levando em consideração o planejamento, operação e manutenção da mina..

Palavras-chave: Integração. Planejamento. Operação. Manutenção. Mineração subterrânea.

ABSTRACT

This research consists of identifying the main challenges and the potential benefits related to the design and management of a system that integrates production information of an underground mine (i.e. planning, operation and maintenance). The objective is to define the user specifications and to measure the benefits of the integration of production processes in terms of cost reduction and competitiveness, with an innovative proposal that can be implemented in mines that are already in operation. The concept of integrating production processes is being successfully used in open pit mines; however, in underground operations, the application of this concept is taking place at slower pace. The prediction of the expected benefits of the proposed online, underground mine oriented expert system was achieved by applying dynamic simulation to an existing mine in operation. The results included the specification of an ideal underground mine management expert systems and the potential gains in mine productivity, that have been found to be over 17%. This paper contributes to the understanding of the role of expert systems in the decision-making process involved in mine production management taking into account mine planning, operation and maintenance.

Keywords: Integration. Planning. Operation. Maintenance. Underground Mine.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Diagrama de atividades propostas para a integração de cadeia de valor mineral. 15
Figura 2 - Processo de invocação da Min_AO2. 16
Figura 3 - Fases de implementação do Min_AO2. 16
Figura 4 - Evolução de abordagem sistêmica nas organizações. 17
Figura 5 – Inter-relações dos processos. 17
Figura 6 - Potencialidades de automação e integração do sistema na mina. 23
Figura 7 – Utilização de capacidade de carga (2006 a 2009). 29
Figura 8 – Coletas de informação no prazo. 30
Figura 9 - Etapas da metodologia da pesquisa. 34
Figura 10 – Frota de boltec, scaler, caminhão, jumbo e LHD. 42
Figura 11 - Processo de digitalização dos registros diários no banco de dados. 42
Figura 12 – Levantamento da média de dados da frota de jumbos. 44
Figura 13 - Levantamento da média de dados da frota de scalers. 44
Figura 14 - Levantamento da média de dados da frota de boltecs. 45
Figura 15 - Levantamento da média de dados da frota de caminhões. 45
Figura 16 - Levantamento da média de dados da frota de LHDs. 46
Figura 17 - Ciclo de produção. 48
Figura 18 – Média de Utilização das frotas totais de boltecs, jumbos, LHDs e scalers pós-intervenção. 49
Figura 19 - Análises de dados da frota de jumbos em % de utilização média. 50
Figura 20 - Análises de dados da frota de scalers em % de utilização média. 50
Figura 21 - Análises de dados da frota de boltecs em % de utilização média. 51
Figura 22 - Análises de dados da frota de LHDs em % de utilização média. 51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tabelas geradas a partir do banco de dados para análises. 43
Tabela 2 - Nº de equipamentos por frota a ser simulada. 46
Tabela 3 - Tempo de serviço por frente e desvio padrão por frota de equipamentos. 47
Tabela 4 - Média de Horas trabalhadas por frota total de equipamentos por dia. 47
Tabela 5 - Utilização média da frota pós-intervenção. 49
Tabela 6 - Ganho médio por frota de equipamentos total avaliada. 52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IOPS	Integrated Operations
SSMA	Saúde, Segurança e Meio Ambiente
ERP	Enterprise Resource Planning
KPI	Key Performance Indicator
MRP	Materials Requirements Planning
MTTR	Mean Time to Repair
OEE	Overall equipment efficiency

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 8
1.1 Objetivo 9
1.2 Questões de pesquisa 10
2 REVISÃO DA LITERATURA 11
2.1 Sistema Integrado de Informações 11
2.2 Desafios existentes na integração 18
2.3 Sistema de despacho 19
2.4 Simulação 30
2.4.1 Simulação em Mineração 33
3 MATERIAS E MÉTODOS 34
3.1 Descrição da Operação 35
3.2 Necessidades existentes na mina 36
3.3 Levantamento de Dados 41
3.4 Processamento de Dados 43
3.5 Simulação Estimativa Pós-Intervenção 46
4 ANÁLISES E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS 49
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES 53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 55
REFERÊNCIAS CONSULTADAS 57

1 INTRODUÇÃO

Um dos principais desafios na mineração subterrânea é integrar as informações das áreas mais atuantes na operação da mina para a tomada de decisões com um sistema que possa fornecer segurança, controle e estabelecer comunicação em tempo real com os equipamentos operantes dentro das minas. Nesta perspectiva, Schleiss (2014) cita que as operações integradas são uma estratégia que precisa envolver todas as pessoas, os processos e a tecnologia a ser utilizada, para assim tomar uma decisão mais rápida e confiável, alinhada ao melhor rendimento. A base de uma integração sustentável, no âmbito da produção, se dá através de uma metodologia estrutural de medição e comparação, enfatizando nos processos de evolução que começam na seleção dos indicadores quantitativos, os quais permitirão a comparação dos cenários e suas integrações.

A operação nas minas subterrâneas oferece maior grau de dificuldade em relação às atividades das minas a céu aberto, já que, por exemplo, o monitoramento e o posicionamento dos equipamentos, a visualização dos locais de carga e descarga, a perfuração e a identificação de gargalos tornam-se atividades mais complicadas de se realizar quando se trata de um ambiente subterrâneo. Além disso, esse tipo de ambiente implica em uma maior dificuldade de comunicação e geração de indicadores, o que ressalta a necessidade reconhecida de melhoria das ferramentas computacionais de sistemas para embasar o planejamento de lavra e a operação de minas subterrâneas. De acordo com Pinto (2017), em minas subterrâneas há maior ênfase em automatização de veículos, devido ao ambiente perigoso de tais minas; enquanto que, em minas a céu aberto, se tem uma vasta implementação de sistemas computadorizados de gerenciamento em tempo real.

Da mesma forma, na opinião do Schleiss (2014), as empresas estão buscando uma maneira de sintetizar todas as informações obtidas a fim de integrá-las com todas as áreas envolvidas, para assim permitir que as organizações tomem decisões mais efetivas na demanda. O futuro das operações, em quase todas as indústrias, será baseado na colaboração, onde as equipes estarão alinhadas e com as informações avaliadas para tomada de decisões mais rápidas e assertivas, alcançando as metas

desejadas. Tudo isso será possível com a implementação de uma estratégia integral das áreas de produção.

A falta de um sistema moderno e bem desenvolvido não permite a interação das informações, o que pode ocasionar um mal gerido dos recursos da mina, já que cada área possui uma fonte de dados diferentes, que não são compartilhados em tempo real com as demais áreas. Tudo isso gera uma demora na tomada de decisões da mina. Esta pesquisa apresentará uma proposta de integração das informações entre os diferentes *stakeholders*[1], com o intuito de incentivar o contínuo monitoramento e controle das operações unitárias da mina subterrânea.

Portanto, está dissertação é composta por cinco capítulos, incluindo esta introdução. Neste primeiro capítulo, são abordados os objetivos e a justificativa da pesquisa. No Capítulo 2, por sua vez, encontra-se a revisão da literatura. A pesquisa bibliográfica exploratória foi realizada em bases de dados contendo artigos, teses, revistas técnicas, com foco na contextualização do objetivo do tema proposto. No capítulo 3, é detalhada a metodologia empregada na pesquisa. Por último, no Capítulo 4, são apresentados os resultados obtidos a partir desta pesquisa, bem como são apresentados os próximos passos do trabalho de pesquisa.

1.1 Objetivo

O objetivo desta dissertação é comprovar ganhos na produtividade de uma operação subterrânea baseado em aprimoramento dos processos gerenciais com um sistema que integre as informações das áreas de planejamento, manutenção e operação. O impacto da aplicação do conceito de gerenciamento integrado das operações será avaliado por meio de simulação dinâmica das atividades de lavra de uma mina subterrânea atualmente em operação.

[1] Partes interessadas dentro de um processo.

1.2 Questões de pesquisa

O presente trabalho busca responder às seguintes questões:

- Quais são os principais desafios para a integração do planejamento e da manutenção com a operação de minas subterrâneas de minérios?

- É possível obter ganhos de produtividade e competitividade com uma integração mais efetiva entre as áreas de planejamento, manutenção e operação em minas subterrâneas?

Tendo em vista as questões colocadas, esse trabalho se justifica na medida em que se comprovem ganhos na produtividade da operação.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A revisão bibliográfica foi feita, inicialmente, sobre o estado da arte da integração entre planejamento, manutenção e operação, com ênfase na indústria mineral. A pesquisa foi realizada através de consultas a especialistas do setor e a partir de uma avaliação do sistema de informações de minas em operação, para se obter o levantamento dos desafios típicos a serem alcançados na interação entre as áreas. Além disso, a partir dessa consulta, intencionava-se ter uma visão preliminar com o objetivo de definir quais são os problemas ocorridos nessas minas.

Ademais, também foi feita uma revisão bibliográfica que envolve os principais cenários de integração de informações, foco deste trabalho de pesquisa, os quais são: a importância de um modelo de integração nas principais áreas de mineração, os desafios/ganhos existentes e os métodos de integrações em outras indústrias.

2.1 Sistema Integrado de Informações

É parte desta pesquisa compreender os conceitos dos Sistemas Integrados de Informações, além de revisar os métodos desenvolvidos nas diferentes indústrias para melhorias da integração de informações.

Para Reis (2005), o Sistema Integrado pode ser definido como um sistema de gestão que integra todos os componentes dos negócios da organização em um único sistema coerente, de forma que seja possível alcançar seu propósito e missão. Burger (2006, p. 1), por sua vez, traz a seguinte definição: “o sistema de gestão mineral é um sistema integrado que gerencia o planejamento e a extração ideal”.

Schleiss (2014) propõe que Integrate Operations (IOPS) é um sistema de integrações operacionais que se originou na indústria petroleira, definida como a integração das pessoas, organizações, processos de trabalho e tecnologia da informação para a tomada de decisões mais inteligentes.

Ainda que a implementação para cada setor possa variar, a execução de IOPS consiste em: colocação de pessoal para as funções essenciais, que incluem produção e confiabilidade, manutenção, planejamento de negócios, logística, SSMA (saúde, segurança e meio ambiente) e utilitários; ambiente de trabalho propício à colaboração dinâmica, incluindo aplicações e videoconferência; acesso em tempo real a dados acionáveis em todos os pontos de contato da operação, incluindo análise e simplificação dos processos de tomada de decisão, bem como fluxos de trabalho alinhados a prioridades organizacionais.

As cinco características da IOPS são (SCHLEISS, 2014):

- O fato de serem operações remotas e monitoramento remoto, o que permite aos operadores e engenheiros melhorarem o controle de processo e resolverem problemas em uma plataforma virtual;
- O fato de fazerem uma manutenção centralizada integrada, fator que permite que as pessoas da manutenção diagnostiquem o equipamento através de ordem de serviço;
- O fato de terem colaborações, o que permite uma interação das áreas de manutenção, produção e pessoal em todas as unidades da empresa;
- O fato de terem um planejamento de produção e otimização, o que permite planejar e otimizar o processo de produção;
- O fato de serem operações de negócios, o que permite a execução de gestão de desempenho operacional.

Por fim, pode-se dizer que a IOPS oferece um suporte na colaboração entre áreas das empresas para otimizar os processos e implementar as melhores práticas, fornecendo um bom embasamento para tomada de decisões.

Outra metodologia sustentável proposta por Tuazon (2012), diz respeito à medição e comparação dos benefícios e impactos das diferentes tecnologias utilizadas, começando com a seleção criteriosa dos indicadores a avaliar até a sua quantificação, de modo a possibilitar a comparação dos cenários. Esta metodologia está focada na

identificação dos problemas e na direção dos indicadores e os riscos predeterminados. Os passos são os seguintes:

- Objetivo e alcance – definições dos objetivos operacionais (produção) e de sustentabilidade;
- Identificação – determinação mediante um diagrama de fluxo; identificação das questões de sustentabilidade ao longo da operação;
- Caracterização de questões de sustentabilidade – uma vez que os problemas foram identificados, é importante classificar os tipos de problemas, a fim de enfrentá-los;
- Formação do problema, avaliação e análise – o importante processo de caracterização de cada questão faz priorizar e analisar o acoplamento entre as questões, porque a resolução de uma questão pode ser compensada negativamente por uma exacerbação resultante de outra.

Por outro lado, tem-se os Sistemas Enterprise Resource Planning (ERP) que há muitos anos têm propiciado uma plataforma para a eficaz incorporação das atividades de suporte da mineração. Nesse sentido, surge nos anos 90 para dar assistência à gestão de empresas, sendo sistemas direcionados para o controle de estoques, manutenção e administração, permitindo, entre seus componentes, uma elevada quantidade de integração, conforme Nader, De Tomi e Passos (2012).

Esse sistema é definido por Souza, Resende e Brito (2013, p. 1) como “único e integrado”, uma vez que permite a integridade e completude dos processos das áreas funcionais no gerenciamento de uma empresa, sendo uma expansão dos programas Manufacturing Resources Planning (MRP). Segundo os autores, esse sistema foi elaborado, inicialmente, visando indústrias de produção discreta. Contudo, atualmente, vem sendo empregado em vários outros setores.

Souza, Resende e Brito (2013) listam determinadas características que são consideradas fundamentais no ERP para que ele seja eficaz. Uma delas é o fato de que qualquer pessoa ligada ao computador principal, ou seja, ao servidor, deve poder ter acesso ao sistema. Isso simplifica a tomada de decisões na empresa, uma vez que

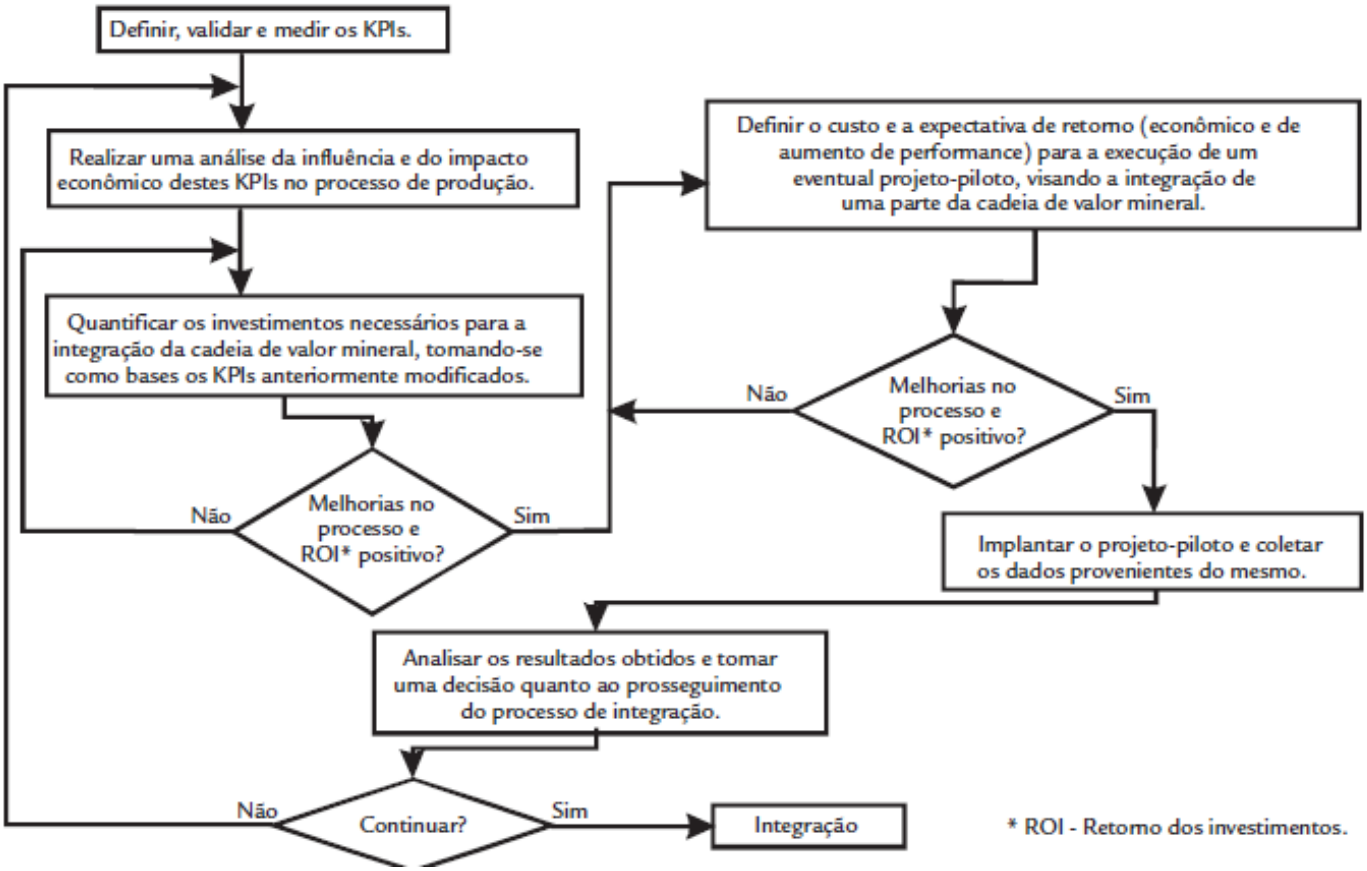
possibilita o acesso atualizado às informações. Outra característica apontada pelos autores diz respeito ao fato de que é possível ligar o ERP a programas externos, entrelaçando-o com planilhas de cálculos usadas por parceiros e colaboradores da empresa.

Por outro lado, Souza, Resende e Brito (2013), ponderam algumas problemáticas referentes ao uso de sistemas ERP em mineradoras. Essas problemáticas dizem respeito a algumas atividades primárias, como “planejamento e controle da produção e relacionamento com o cliente externo”. Segundo os autores, essas dificuldades decorrem das especificidades apresentadas pelo processo de produção mineral, bem como da incompatibilidade do ERP em relação a programas que modelam a mina geologicamente e por meio de mapeamento, de geoestatística, de cálculo de reservas minerais e de planejamento.

Nader (2011) também aponta algumas dificuldades apresentadas pelos sistemas ERP. Para o autor, esses sistemas não seriam capazes de solucionar os problemas da área primária da cadeia de valor mineral por causa dos seguintes fatores: (a) a imprecisão geológica, condição intrínseca à indústria de mineração; (b) a heterogeneidade dos tipos de dados que são encontrados em diversos intervalos de tempo que cada processo requer.

A partir das análises desses autores, foi proposta uma metodologia que pudesse integrar a cadeia de valor mineral desde o ponto da definição dos Key Performance Indicator (figura 1), onde foram realizadas pesquisas de campo dos KPIs importantes, para assim provar as análises quantitativas e qualitativas da integração. Baseadas na definição desses autores, as empresas conseguiram ponderar sua influência no controle das atividades de mineração, conforme Nader, De Tomi e Passos (2012).

Figura 1- Diagrama de atividades propostas para a integração de cadeia de valor mineral.



Fonte: Nader, De Tomi e Passos (2012, p. 4).

Na indústria da mineração foi desenvolvido um projeto em uma mina a céu aberto em conjunto com os pesquisadores da Universidade de São Paulo, o *Mining Asset Otimization* (Min_AO2: Gestão Sistêmica de Planejamento e Operação de Lavra na Mina do Futuro, 2018). Esse projeto tem como objetivo a otimização de ativos, propondo melhorias na integração dos processos com as áreas de manutenção, geologia e operação, a fim de ter uma maior efetividade no planejamento, além da automação destes processos e dados nos sistemas de integração. Ademais, este projeto desenvolve um plano para automatizar procedimentos que permitam um uso mais inteligente, utilizando-se de avançadas técnicas de simulação (figura 2).

Figura 2 - Processo de invocação da Min_AO2.

Processo	Tradicional	Inovação/melhoria
Planejamento de lavra	O planejamento de lavra atuava de forma reativa, de acordo com os resultados de aderência dos planos de lavra, avaliando-se o alcance ou não dos resultados projetados	São usados modelos de simulação para antecipar possíveis problemas no alcance de indicadores e ação mais proativa no planejamento de longo prazo
Previsão de indicadores de manutenção em planos de longo prazo	Previsão baseada apenas no histórico de manutenção e nos planos de manutenção preventiva	Os planos de manutenção dos equipamentos são validados com modelos de simulação estocástica (que considera e quantifica a incerteza associada às variáveis), usando modelos de previsão por séries temporais que possibilitam análise de risco do não alcance de metas no futuro
Otimização dos processos	Subutilização dos dados do despacho (responsável pelo transporte das cargas), limitando-se à avaliação de históricos dos indicadores para definição de metas dos planos de lavra	Uso estruturado dos dados do despacho e análises com métodos probabilísticos e de quantificação de risco, alimentando modelos de otimização estocástica, tanto do sequenciamento de lavra, quanto de uso dos equipamentos

Fonte: Disponível em: http://www.vale.com/brasil/PT/initiatives/innovation/mais/Documents/vale_revista-mais_digital_por_minao_en.pdf. Acesso em 21/05/18.

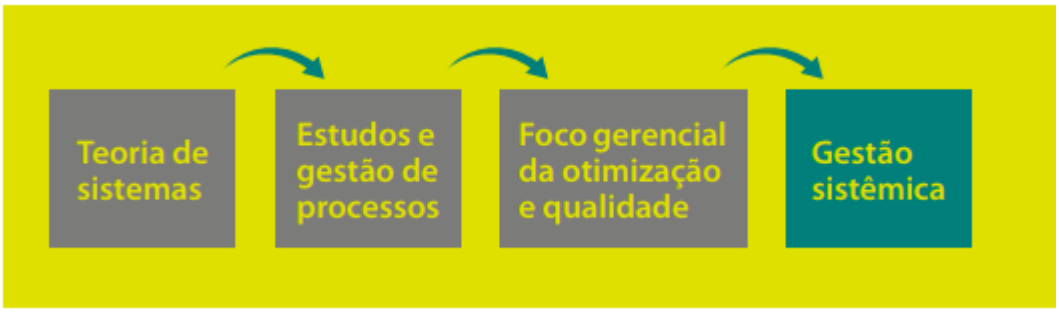
O Min_AO2 tem o objetivo de levar a mina atual à uma mina chamada “mina inteligente”, na qual, após os estágios da Figura 1, possa-se alcançar um ambiente de gestão sistemática esperada como na Figura 2. O conceito de gestão sistemática é explicado por De Tomi (2016) como a integração de diferentes áreas de conhecimento que é necessária para uma efetiva interpretação de problemas em onde cada elemento gera uma cadeia de entrada, processo e saída que viabiliza o alcance dos objetivos; esta sinergia terá maior valor do que ter os elementos por separados.

Nas figuras 3 e 4 apresentadas abaixo é possível observar as etapas nas quais foi implementada e abordada o Min_AO2.

Figura 3 - Fases de implementação do Min_AO2.

Fonte: http://www.vale.com/brasil/PT/initiatives/innovation/mais/Documents/vale_revista-mais_digital_por_minao_en.pdf. Acesso em 21/05/18.

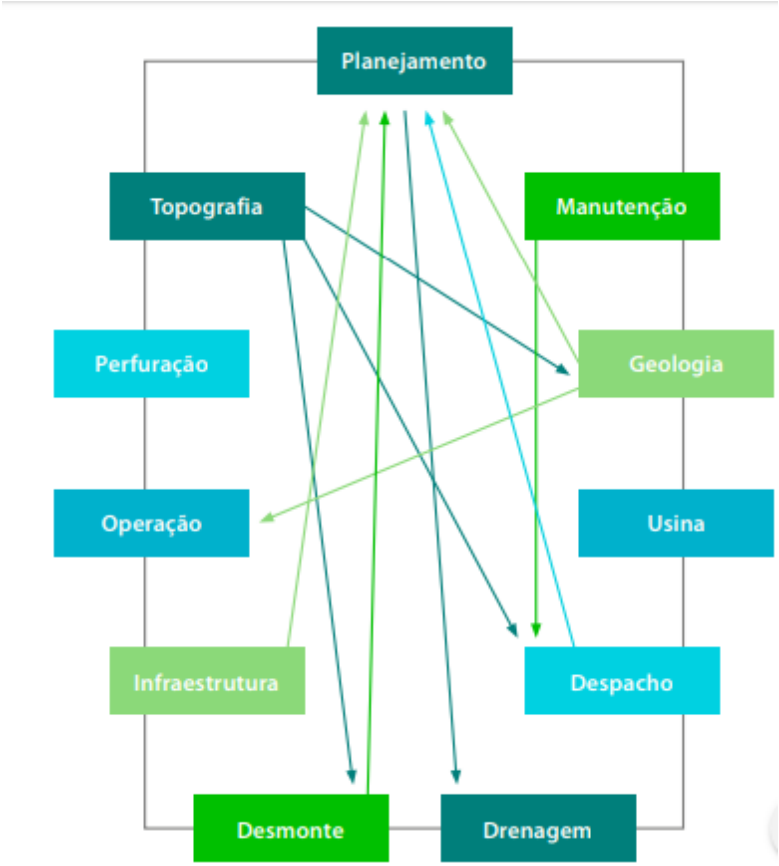
Figura 4 - Evolução de abordagem sistêmica nas organizações.



Fonte: disponível em: http://www.vale.com/brasil/PT/initiatives/innovation/mais/Documents/vale_revista-mais_digital_por_minao_en.pdf. Acesso em 21/05/18.

No mesmo *workshop*, foram apresentadas esquematicamente as inter-relações que existem entre os diversos processos envolvidos no planejamento e operação de lavra (figura 5).

Figura 5 – Inter-relações dos processos.



Fonte: disponível em: http://www.vale.com/brasil/PT/initiatives/innovation/mais/Documents/vale_revista-mais_digital_por_minao_en.pdf. Acesso em 21/05/18

Este projeto tem tido, como resposta, uma integração efetiva das informações para apoiar a tomada de decisões operacionais na mina a céu aberto com abordagem probabilística utilizando modelos matemáticos de otimização e inteligência artificial, segundo De Tomi (2016).

2.2 Desafios existentes na integração

Um dos desafios encontrados por Schleiss (2014) expõe que muitas empresas, depois de anos, levam suas áreas a se configurarem como departamentos burocráticos, onde cada uma destas se ocupam, principalmente, de seus próprios processos e objetivos, deixando de prestar atenção aos objetivos gerais da empresa. A informação tende a ser compartilhada de forma limitada, tendo, assim, pouco intercâmbio entre as decisões a serem tomadas, o que demonstra uma perspectiva restrita. Nesse sentido, as decisões são tomadas a favor de uma determinada área, sem observar se elas caracterizam o melhor para toda a organização.

Outros problemas relativos à integração encontrados por Short e Mielli (2012) são os problemas dos sistemas de controle de processo, que são a base de dados comum. Isso porque, em certos sistemas, os componentes de controle são configurados individualmente, em que cada variável, para se encaixar em outro sistema, tem que ser reinstalada, o que ocasiona em erros e perdas de informações. A falta de sistemas abertos e amistosos entre as áreas também interfere na integração. O sistema atual de integração pode ser considerado antiquado, visto que pode se tornar um obstáculo para que as operações transcorram sem problemas. Isso ocorre uma vez que esse sistema deixa de atender as necessidades atuais das organizações, por não ser completo e flexível.

Como é observado por Nader, De Tomi e Passos (2012, p. 1):

> Apesar do avanço obtido com a aplicação dos computadores, não se conseguiu, até o presente momento, integrar, efetivamente, as atividades primárias da cadeia de valor mineral. A principal razão, para isso, são as incertezas existentes no processo produtivo, que são intrínsecas ao negócio, e a dificuldade de se quantificarem e qualificarem os benefícios advindos de tal integração, isto por não existir uma definição clara dos indicadores-chave de desempenho (KPIs).

No entanto, um dos principais desafios de integração de informações, exposto por Burger (2006), é que a maioria das empresas de mineração conceitua, projeta e implementa esses sistemas de automação de mineração sem considerar a visão holística de integrar toda a cadeia de valor da mineração. Como resultado dessa falha, os programas de automação, que são implementados, não dão certo ou são colocados em segundo plano, já que as operações perderam a confiança no uso real dessa tecnologia.

A maior parte dos esforços das operações de mineração visam automatizar o equipamento no subsolo sem considerar a necessidade de integração com o planejamento de mineração. Esta falta de visualização cria sistemas operacionais ineficientes, resultando em numerosos atrasos de produção e modificações no sistema, levando ao seu fracasso final (BURGER, 2006).

O principal desafio para qualquer operação de mineração subterrânea está na integração das múltiplas fontes de informações relacionadas à produção em uma infraestrutura de mineração e automação flexíveis. Contudo, essa integração deve permitir que a equipe supervisora da mina melhore sua capacidade de tomada de decisão de curto prazo, ao mesmo tempo em que forneça dados históricos à alta administração, para que ela possa fazer os ajustes necessários aos objetivos de longo prazo da organização (BURGER, 2006).

A chave para o sucesso no desenvolvimento e implementação de sistemas de gerenciamento de informações subterrâneas e automação de minas é a integração ou interconexão inteligente entre essas tecnologias. A implementação bem-sucedida da automação das soluções de gerenciamento de produção de mina, realizadas e apoiadas por um sistema de gerenciamento de informações aceito pela indústria, melhorará drasticamente não apenas a segurança e a produtividade, mas também a lucratividade das empresas (BURGER, 2006).

2.3 Sistema de despacho

O sistema de despacho é uma ferramenta/produto de monitoramento utilizado em minas subterrâneas, capaz de controlar, gerenciar e dirigir as operações unitárias

(preparação de frentes e acessos; perfuração e desmonte; produção de minério e estéril; apoio operacional; e infraestrutura da mina) alinhadas ao planejamento da mina, ao fornecimento de informações em tempo real e ao controle dos estados da frente de serviço com os dos equipamentos. O objetivo desse sistema é otimizar o gerenciamento das atividades para uma melhor tomada de decisões, uma vez que o uso de tecnologias avançadas para comunicação, rastreio, visualização dos mapas e relatórios dinâmicos de informação ajudam muito para um controle maior.

Por outro lado, visando a implementação do despacho de instrumentos de transporte, diversas técnicas e métodos têm sido elaborados (PINTO, 2007). Conforme nos mostra Pinto (2007), esses procedimentos podem ser divididos em três tipos de sistemas de despacho para caminhões, a saber:

1. Sistema de despacho manual: esse sistema configura-se como padrão na alocação de caminhões, tendo sido usado a partir do início dos anos 60. Em uma mina a céu aberto, o despachador fica situado em ponto de visão privilegiado na mina, tomando decisões com base em seus conhecimentos e na circunstância que presencia. Deste modo, dirige-se por meio de rádios transmissores aos responsáveis pelos instrumentos de transporte e carga.

2. Sistemas de despacho semiautomáticos: neste sistema, o computador (centro posicionamento dos equipamentos) é programado para facilitar ao despachador na tomada de decisão referente à alocação dos caminhões. O computador não tem comunicação direta com o equipamento, sendo indispensável que o despachador decida e comunique todas as instruções.

3. Sistemas de despacho automáticos: são considerados os mais sofisticados atualmente, visto que não

> necessitam da mediação de um despachante para a tomada de decisões sobre o despacho dos caminhões. O computador, por si só, é capaz de realizar essa tarefa.

Pode-se dizer que um sistema de despacho empreendido a partir de um planejamento eficiente é capaz de gerar corte de gastos para as companhias incorporadas no setor de mineração. Contudo, Tu e Hucka (1985) apontam para a necessidade de um estudo mais cauteloso com o intuito de se verificar se as melhorias de produtividade que esse sistema proporciona compensam os custos de sua implementação.

Segundo Çetin (2004), o que tem conduzido a indústria de mineração no desenvolvimento de modelos de tomada de decisão são as melhorias expressivas na tecnologia da informação. O autor pondera que, com esses modelos, é possível se alcançar uma alocação mais adequada dos caminhões em minas de céu aberto. Nesse tipo de mina, os sistemas computadorizados de despacho, que foram produzidos nos anos 70, passaram a ser o modo de operação mais genérico dentre todos (ÇETIN, 2004). Entretanto, esses sistemas não são viáveis em se tratando de minas de médio porte e de pequeno porte, tendo em vista seu superior custo de implementação (ÇETIN, 2004). Ainda assim, segundo Çetin (2004) a evolução da informática, que viabiliza uma diminuição de seu custo de implantação, tem proporcionado maiores possibilidades de implementação em minas de portes menores.

Um sistema de despacho integra uma cadeia de valor de atividades de mineração. Porter & Millar (1985, p. 10) definem a cadeia de valor de uma empresa como sendo “a rede de atividades independentes de uma organização, conectada por ligações operacionais”. Sendo assim, para eles, quando a maneira como uma determinada atividade foi executada acaba por atingir os cursos e a estabilidade de outras, temos a efetivação dessas redes. Na visão de Nader, De Tomi e Passos (2012), para se integrar a cadeia de valor mineral de modo a obter as vantagens dessa integração é necessário medir seu impacto por meio dos chamados “indicadores-chave de desempenho (KPI)”. Dessa forma, é possível se fazer uma quantificação dos ganhos alcançados. Os autores destacam a falta de métricas concretas capazes de quantificar

as vantagens trazidas pela integração da cadeia de valor contrapostas aos devidos investimentos que se fazem necessários para sua implementação.

Um sistema desta complexidade deve ter como objetivo uma utilização efetiva dos equipamentos, tanto em áreas subterrâneas, quanto na superfície, a fim de garantir a maximização da produção e produtividade. Assim, por consequência, ter-se-á uma otimização dos processos produtivos como perfuração, detonação, saneamento, contenções, extração, carregamento e transporte de minério/estéril, diminuindo, assim, atrasos operacionais.

Em um cenário de mina subterrânea, o uso de tecnologias para o controle de localização de equipamentos, comunicação e transferência de dados dentro da mina, usando uma rede de *Leakyfeeder* [2]ou *Wifi*[3]*,* é essencial para que o sistema consiga se desenvolver adequadamente. Esta funcionalidade ajudará a rastrear a frota em tempo real, tanto na área subterrânea, quanto na superfície, permitindo a otimização do uso dos equipamentos com base na localização e gestão de tarefas, possibilitando saber, em tempo real, a localização e qual atividade está sendo executada, assim como o executor.

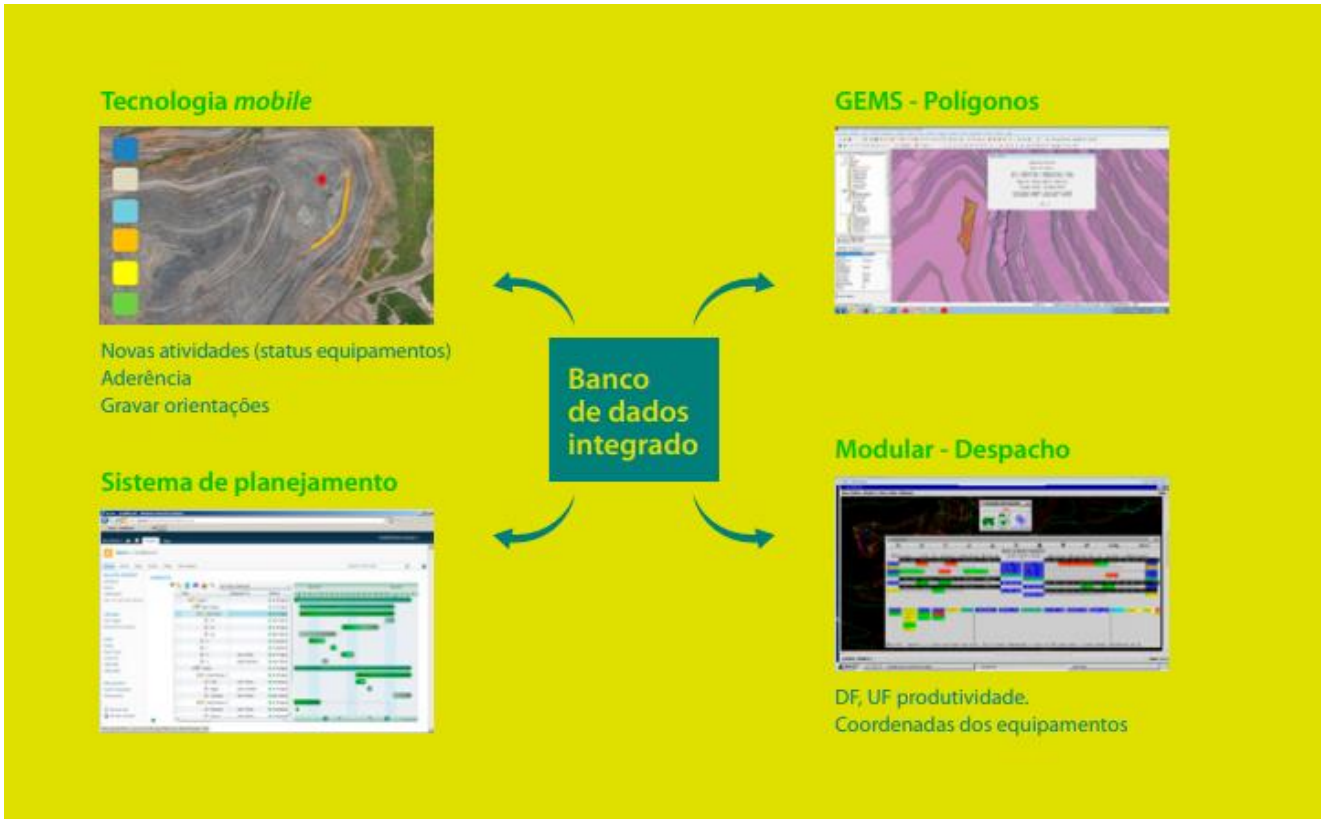
Segundo Saayman et al. (2006), mesmo que se mantenham os conceitos gerais de despacho de veículos, nas minas subterrâneas as rotas são alteradas constantemente com a abertura e a eliminação de galerias. Sendo assim, para o autor, o sistema de despacho nesse tipo de mina deve considerar, também, as condições em que se encontra as estradas. Essas estradas sofrem de deterioração com frequência em virtude do peso dos caminhões devendo ser reparadas regularmente, o que atrasa a locomoção dos veículos (SAAYMAN et al., 2006).

Campelo, Marin e De Tomi (2017) afirmam que os progressos atuais na tecnologia, tais como a gravação e o armazenamento de indicadores de desempenho em banco de dados, permitem o monitoramento constante das atividades dos equipamentos. Com isso, visa-se à “centralização de dados e integração para uma análise mais elaborada” (CAMPELO; MARIN; DE TOMI, 2017, p. 1). O Projeto Mio_AO2,

[2] Cabo coaxial que emite e recebe ondas de rádio
[3] Antenas que emitem e recebem ondas de rádio

explicitado anteriormente, tem como objetivo integrar todos os sistemas utilizados atualmente aos que virão a ser incorporados (figura 6), de modo que se possa ganhar tempo e qualidade no planejamento direcionado à tomada de decisões, sem que haja, por exemplo, a necessidade de preencher planilhas, como as que são feitas para definir a programação diária das áreas de drenagem, perfuração, operação, infraestrutura e topografia. Isso também pode ser feito no GEMS, que é o sistema computacional proposto de planejamento de mina do MIO Mina Integrada o qual será alimentado de informações por diferentes períodos para identificar as decisões tomadas para cada situação; se poderá aprender do banco de dados e com a aplicação da inteligência artificial se melhorara a ferramenta de toma de decisão (DE TOMI, 2018).

Figura 6 - Potencialidades de automação e integração do sistema na mina.



Fonte: http://www.vale.com/brasil/PT/initiatives/innovation/mais/Documents/vale_revista-mais_digital_por_minao_en.pdf. Acesso em 21/05/18.

Seguindo esta ideia de um sistema de despacho otimizado para a indústria, é possível traçar as características gerais que ele deverá ter:

- Ser adequado para funcionar ininterruptamente;
- Realizar autenticação integrada ao sistema operacional;
- Manter registros de acessos;
- Disponibilizar visão aproximada das máquinas na mina, indicando rotas e vias;
- Disponibilizar acesso à base de dados para geração de relatórios, como é comentado por Campelo, Marin e De Tomi (2017, p. 1): “Antes de ir para a área de planejamento, atuei no despacho e, nessa trajetória, percebi que havia muito a simplificar na definição de produzir de um dia para o outro, usando informações do banco de dados”;
- Ser modular e passível de atualizações.

Além disso, um sistema do despacho deverá cumprir as seguintes funções:

- O sistema do despacho será responsável por disponibilizar as principais ações do sistema para o centro de controle operacional, informando como realizará as ações de alocações. Ademais, será responsável por enviar mensagens para os equipamentos, monitorar o estado atual de cada um deles e verificar o posicionamento dentro dos túneis e das áreas de extração, controlando, assim, a produção que será contabilizada automaticamente através dos apontamentos realizados por cada equipamento;
- Banco de dados: onde irá constar as principais informações cadastrais e configurações que irão suportar o sistema. Será através desta funcionalidade que os usuários farão os cadastros e alterações dos seguintes itens: equipamentos, operadores, árvores de estados e de todas as demais entidades participantes do processo da operação. Esse banco de dados estará sempre à disposição dos usuários, que poderão utilizá-lo para realizarem avaliações de índices, de quebra e histórico de itens problemáticos. Também ficará disponível um relatório em que os usuários poderão visualizar todos os *checklists*[4] realizados e os dados do equipamento como data e hora de realização, operador e itens não conformes.

[4] Documento de verificação de pontos críticos dos equipamentos antes do início da operação.

Ter um banco de dados consolidado ajudará a manter uma produtividade da frota que servirá para o dimensionamento, como sugerem Campelo, Marin e Tomi (2017) que para elaboração de planos de produção (lavra) é necessário realizar um correto dimensionando da capacidade produtiva dos equipamentos incluídos nas atividades de perfuração, carregamento e transporte (disponibilidade física, a utilização física e a produtividade), este dimensionamento é uma peça de primordial importância para as decisões a serem tomadas (curto e longo prazo).

Com um banco de dados sobre diferentes operações, é possível elaborar relatórios de produtividade com dados referentes à máquina que mais operou, ou o operador que mais toneladas de minério carregou, ou furos perfurou. Assim, os relatórios podem mudar a cultura dentro da empresa, analisando e premiando os melhores motoristas (motivando-os cada vez mais), estimulando planos de conscientização em cima de falhas comuns apresentadas pela equipe, dentre outras vantagens, a seguir algumas outras funções que o sistema do despacho deverá cumprir:

- Verificar as ações de planejamento da operação da mina onde farão a carga e a atualização periódica do mapa da mina, desenharão e ajustarão rotas, atualizarão o plano de lavra, dentre outros planejamentos de tarefas operacionais. Os níveis de planejamento, o intervalo de cada plano e os tipos de tarefa planejados são configuráveis, dependendo da necessidade e tipo de operação da mina;

- Monitoramento em tempo real, através do qual os usuários terão interfaces específicas à disposição para o monitoramento e o gerenciamento das informações criadas pela parte diária de cada equipamento, sobre as viagens executadas, a produção dos equipamentos de perfuração, dentre outros;

- Encarregar-se da otimização do ciclo de atividades onde deverá conter as informações de cada etapa da lavra e desenvolvimento, bem como os recursos necessários para cada atividade como saneamento, liberação, topografia, perfuração, carregamento de explosivos, desmonte, movimentação de material, equipagem, etc. Isso possibilita o

acompanhamento do avanço de cada etapa, a estimativa dos tempos de transporte de equipamentos entre frentes atuais e futuras, bem como o indicativo dos melhores cenários de aproveitamento de frota de forma dinâmica, acompanhando os avanços e estados reais e apresentando melhores soluções e reprogramação.

Para Costa (2015), o sistema de despacho é essencial para a redução de custos na roteirizarão das máquinas em uma mina, além de garantir a qualidade do minério e sua produtividade, tornando-se algo estratégico para a empresa. Tendo uma gestão completa da situação das frentes de trabalho, com o monitoramento da situação atual de cada local, é possível a alocação correta de equipamentos de acordo com cada situação e o seguimento do planejamento.

Contar com um sistema do despacho gera um banco de dados confiável, onde se pode realçar avaliações tanto dos KIPs da Mina, como também dos KPIs das áreas de apoio. Para Nader, De Tomi e Passos (2012) é necessário identificar os KPIs que permitiram quantificar e qualificar as vantagens advindos da integração da cadeia de valor mineral, estes poderão ser mapeados fornecendo dados em diferentes situações que possam ser quantificadas numericamente com fins de resguardar o investimento e o retorno esperado de incremento da eficiência.

Além de se obter ganho na produtividade, encontram-se também ganhos na segurança das operações, já que ter-se-ia visualização e controle de pessoas e equipamentos no interior da mina, apontando tempos em que não há atividade, alarmes de dados e eventos. Isso aumentaria os níveis de segurança através do uso de ferramentas automatizadas, como o *checklist* de segurança; conforme Nader, De Tomi e Passos (2012).

Existem ferramentas específicas, como a inspeção visual e o *checklist* de segurança que garantir o bom funcionamento do equipamento. Comumente, essas ferramentas são utilizadas pela maioria das mineradoras sob a forma de um formulário impresso. Isto é feito para se garantir boas condições do equipamento e a correta operação do mesmo. Essas condições são extremamente importantes para a segurança do operador durante a realização de suas atividades.

Além disso, os formulários impressos podem ser substituídos por formulários eletrônicos dentro do computador de bordo. Dessa forma, os operadores terão acesso ao *checklist* automaticamente, assim que iniciarem a operação no equipamento. Os itens do procedimento serão preenchidos com toques na tela do computador de bordo e deverão ser marcados como conformes ou não conformes, de maneira simples e direta.

O sistema atinge diretamente os fatores que causam perda de tempo e dinheiro na empresa por conta disso e apresenta resultados em curto prazo, permitindo até mesmo o retorno do investimento inicial, além de resultados com respeito à gestão dos equipamentos móveis. Sendo assim, o sistema possibilita:

- Monitoramento da operação, indicando atividade dos equipamentos;
- Geração de informações e indicadores, permitindo o monitoramento e apoiando as tomadas de decisão sobre o uso da frota;
- Atuação pontual para garantir os níveis adequados de produtividade, disponibilidade, utilização e rendimento dos equipamentos;
- Implementação de melhorias principalmente nos processos de transporte e desenvolvimento;
- Aumento da eficiência operacional dos equipamentos, gerando:
    - maior produtividade;
    - redução de atrasos operacionais;
    - maior utilização efetiva da frota.

As mineradoras que utilizam a solução *Dispatch Underground*[5] têm divulgado ganhos relativos a melhorias no gerenciamento de operações de minas, incluindo a manutenção de equipamentos. Este é um benefício exclusivo que tem justificado a sua contratação por mineradoras dos mais diversos portes em todo o mundo e, em especial, pelas maiores empresas no país, pois ganhos dessa ordem representam milhões de dólares em receita anual para tais empresas (COSTA; GANGA, 2010).

[5] Nome comercial do programa de despacho da Modular Mining Systems.

Costa e Ganga (2010) analisam o caso de uma mina a céu aberto que implantou um sistema de despachos. Após as avaliações de resultados, os autores concluem um aumento de utilização dos equipamentos, coletas e confiabilidade de informação no prazo e redução de custos de transporte.

Um dos casos práticos citados por Costa e Ganga (2010), com relação ao antes e o depois da instalação de um sistema de despacho, se deu a partir da programação das rotas de transporte as quais eram decidas em base a experiência própria do responsável da área, entretanto a decisão tomada não representaria a melhor solução por não ter uma visão do processo como tudo.

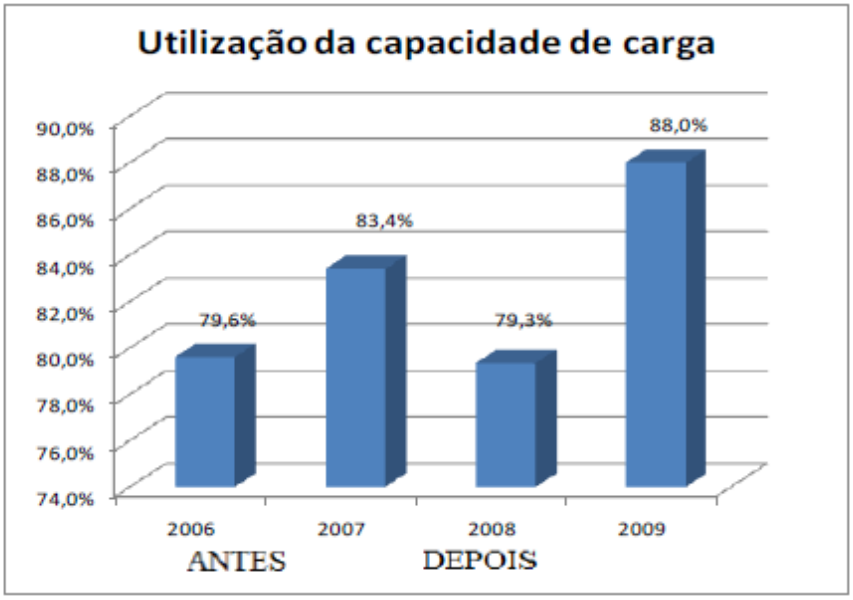
De acordo com Costa e Ganga (2010), por causa dos obstáculos presenciados pelo funcionário cuja responsabilidade era a de alocar os equipamentos da mina, adquiriu-se o chamado *SmartMine*[6]. O *SmartMine* é um programa de despacho dinâmico que foi criado para efetuar o roteamento de veículos nas minerações, traçando suas rotas a partir de simulações; esse programa é guiado por um algoritmo genético e pondera sobre as limitações de minérios e máquinas (COSTA; GANGA, 2010).

Por meio do uso do programa *SmartMine,* o sistema de despacho de caminhões pôde ser utilizado de forma mais dinâmica, uma vez que a tomada de decisão dos controladores de transporte passou a ser realizada automaticamente, deixando de depender da experiência dos funcionários (COSTA; GANGA, 2010).

Segundo Costa e Ganga (2010), por meio de indicadores datados de 2006 a 2009, pode-se evidenciar a implantação do programa de despacho de caminhões em 2007. Isso pode ser ilustrado pela figura 7.

[6] Nome comercial do programa de despacho da Hexagon Mining Inc.

Figura 7 – Utilização de capacidade de carga (2006 a 2009).



Fonte: Costa e Ganga (2010, p. 11).

Costa e Ganga (2010) demonstram que, na figura 7, quando se observa a porcentagem do uso da capacidade de carga, tem-se que, em relação aos anos 2006 e 2007, o ano de 2009 apresenta um uso superior. Contudo, nota-se também o rendimento inferior com o programa já implantado no ano de 2008. Os autores ponderam que isso se explica porque, conforme o relato dos diretores da empresa em questão, a baixa da utilização da frota se deveu a defeitos na preservação dos equipamentos (COSTA; GANGA, 2010).

De acordo com os relatórios de performance da empresa, tem-se que os indicadores de custo também demonstraram um melhor desempenho com o uso do sistema: houve uma redução de 28% dos cursos de transporte por tonelada e uma redução de 10% na produção de ouro (COSTA; GANGA, 2010).

No que se refere ao percentual de coletas de informações no prazo, como se pode observar na figura 8, nota-se um importante aumento em 2008 e 2009 (COSTA; GANGA, 2010).

Figura 8 – Coletas de informação no prazo.

Fonte: Costa e Ganga (2010, p. 11).

Tendo analisado esses dados, podemos afirmar, juntamente com Costa e Ganga (2010), que há grandes vantagens e benefícios de se implementar um sistema de despacho em uma empresa, a saber, um crescimento no nível de uso da capacidade de carga, o aumento das coletas no prazo e, por fim, a diminuição do custo de transporte. Além disso, outros benefícios alcançados com o programa foram apontados pelos autores: “dados históricos com alto nível de confiabilidade, um maior controle do processo da planta, além de uma melhoria no clima organizacional da companhia” (COSTA; GANGA, 2010, p. 1).

2.4 Simulação

O termo simulação pode ser usado em diferentes áreas de atuação, não só na mineração, por isso, faz-se necessário apresentar suas diversas definições de acordo com o contexto.

De acordo com Robinson (2004), a simulação é uma aproximação experimental para a modelagem, servindo como ferramenta de estudo, já que é realizada com dados de

entrada, gerando um modelo com diferentes cenários e com uma previsão de resultados. Desta forma, o usuário pode mexer no modelo com o intuito de gerar cenários alternativos até identificar o melhor, ou seja, aquele que reflexe o cenário ideal que servirá para a tomada de decisões.

Segundo Marin (2009), a simulação pode ser dividida em duas categorias: computacional e não-computacional. Enquanto a primeira necessita de computadores para ser executada, a última, como o próprio nome indica, dispensa essa necessidade, como, por exemplo, no caso de protótipo em escala reduzida.

Para Miyagi (2002, p. 2), a simulação é uma “imitação de uma operação ou processo do mundo real” que gera uma “história artificial” para análises das características operacionais; este comportamento é estudado através de um modelo de simulação. Segundo a autora, esse modelo, depois de ser aperfeiçoado e validado, pode ser utilizado para averiguar diversos pontos sobre o sistema, bem como estudar os sistemas antes de sua efetiva implementação, ainda durante sua criação.Nesse sentido, serve como ferramenta para predizer os efeitos das mudanças nos sistemas existentes, avaliando e validando o desempenho de novos sistemas.

De acordo com Botter (2002, p. 147) “a simulação é o processo de elaborar um modelo de um sistema real e conduzir experimentos com este modelo, como o propósito de compreender o comportamento do sistema, ou avaliar várias estratégias para a operação do mesmo”.

Com o avanço na tecnologia da informação, o uso do termo de simulação passou a ser sinônimo de Simulação Computacional, que Prado (2004, p. 1) definiu da seguinte forma: “simulação é a técnica de solução de um problema pela análise de um modelo que descreve o comportamento do sistema usando computador digital”. Em outras palavras, a simulação é uma representação de um sistema baseado em um modelo simplificado da realidade, construído nas variáveis de interesse.

Por outro lado, temos autores como Chwif e Medina (2006), que demonstram uma apresentação diferente. Eles explicitam o que não é a simulação, considerando o que a maioria de pessoas acham que é:

- “A simulação não é uma bola de cristal” (CHWIF; MEDINA, 2006, p. 255): com isso, os autores pretendiam demonstrar que não é tarefa da simulação prever o futuro, mas, sim, o desempenho de um sistema. Isso partindo de dados de entrada e seguindo premissas determinadas;

- “A simulação não é um modelo matemático” (CHWIF; MEDINA, 2006, p. 255): com essa asserção, os autores demonstram que a simulação não pode ser simplificada a um cálculo básico, de forma que não existe um grupo de equações capaz de fornecer resultados sobre o desempenho do sistema;

- “A simulação não é uma ferramenta estritamente de otimização” (CHWIF; MEDINA, 2006, p. 255): de acordo com os autores, a simulação é antes uma ferramenta de análise que uma ferramenta de otimização;

- “A simulação não substitui o pensamento inteligente” (CHWIF; MEDINA, 2006, p. 255), não podendo tomar o lugar do ser humano no processo de tomada de decisões;

- “A simulação não é uma técnica de último recurso” (CHWIF; MEDINA, 2006, p. 255): segundo os autores, atualmente a simulação é uma das técnicas mais empregadas na Pesquisa Operacional e na Ciência da Administração. Porém, no passado, ela era considerada uma técnica de último recurso, quando todas as outras falhassem;

- “A simulação não é uma panaceia que irá resolver todos os problemas” (CHWIF; MEDINA, 2006, p. 255): com essa afirmação, os autores ressalvam que, em muitos casos, a simulação não deve ser aplicada. Entretanto, se o problema a ser analisado for de grande complexidade e dinamicidade, bem como se apresentar aleatoriedade, a simulação é a melhor opção.

2.4.1 Simulação em Mineração

Segundo Turner (1999) e Panagiotou (1999), nos últimos tempos, as técnicas de simulação visando a elaboração e a investigação de projetos de operação nas minas são cada vez mais populares, permitindo avaliar os comportamentos de sistemas novos ou seu aperfeiçoamento. Sendo assim, de acordo com Turner (1999) e Panagiotou (1999), na indústria de mineração, a simulação tem tido um maior índice de aprovação, tornando-se fundamental tanto para o planejamento de minas novas, quanto para o controle das operações. Ainda, pode-se acrescentar que o surgimento da simulação se dá na medida em que ela se apresenta como uma maneira vantajosa de se investigar as consequências de novos investimentos e na medida em que ela traz propostas de novos métodos de se lidar com a mineração (TURNER, 1999).

Os softwares mais populares de simulação para as operações de mina, segundo Sturgul (2001), são GPSS/H da Wolverine Software e Arena da Rockwell Automation, além de serem os softwares mais usados nas últimas pesquisas por profissionais do mundo inteiro.

O Arena, de acordo com Kelton et al. (2015), é um software de simulação para eventos discretos que examina o ambiente operacional com foco nos processos que existem no sistema.

De acordo com os autores Chwif e Medina (2010), a escolha do software de simulação é um ponto importante em qualquer estudo de simulação, mesmo não sendo visto como uma etapa fundamental, uma vez que o fator mais importante e crítico para o sucesso está ligado ao analista que está fazendo o estudo. Contudo, não se pode negar que a escolha adequada do software para o estudo de simulação tem influência especialmente no tempo total de um estudo de simulação.

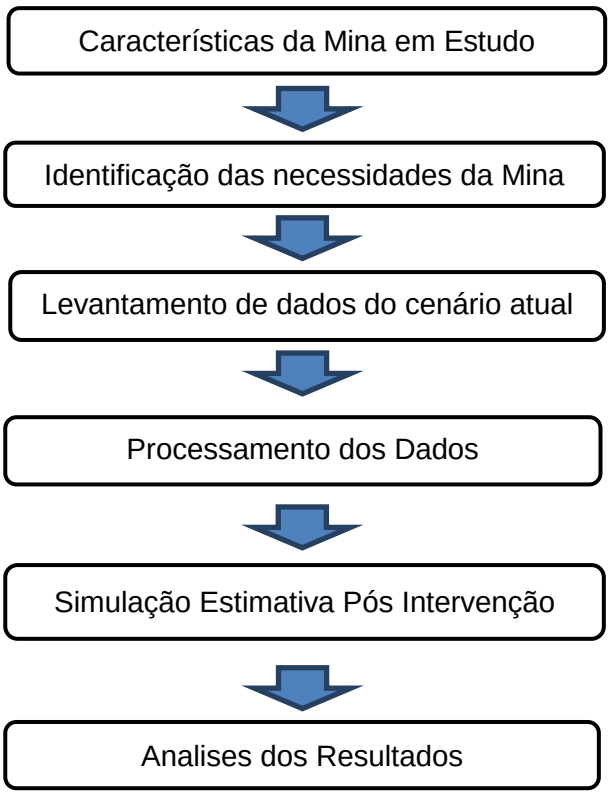
Por outro lado, Cremonese e Livorattil (2012), o programa que é utilizado não é um ponto crítico. O que é crítico é usar a ferramenta certa (simulação dinâmica/simulação de processo/cálculo analítico).

No presente trabalho usaremos a Simulação Dinâmica que de acordo ao autor Cremonese (2014) é uma ferramenta que ajuda na toma de decisões, equilíbrio dos recursos e capacidades dos sistemas oferecendo oportunidades na otimização do capital investido para minimizar os riscos. Este modelo oferece de maneira ilustrativa uma visão geral do processo permitindo um análise das alternativas de maneira rápida e a baixo custo.

3 MATERIAS E MÉTODOS

Neste capítulo, apresentam-se os procedimentos metodológicos da pesquisa e as etapas de seu desenvolvimento. O capítulo será dividido da seguinte maneira: primeiramente, será feita uma descrição do tipo de pesquisa em relação às necessidades da mina a ser estudada; ainda, serão apresentadas a fonte e a coleta de dados e, por fim, será levantado a depuração dos dados e os resultados obtidos. O presente estudo dividiu-se a partir das seguintes etapas descritas na figura 9.

Figura 9 - Etapas da metodologia da pesquisa.



,

Fonte: elaborado pela autora.

3.1 Descrição da Operação

As metodologias desenvolvidas neste trabalho foram realizadas tendo como referência uma mina subterrânea de grande porte do Norte de Minas Gerais (produção anual maior a 500.000 t/ano), com método de lavra de *Sublevel Stopping*. Esta mina tem operações tanto da lavra como de desenvolvimento, contando com frotas próprias de transporte (caminhões), perfuração (jumbos e simbas), suporte (boltecs e cabolts), saneamento (scaler) e limpeza (LHD). As frotas mais críticas são as de transporte e limpeza. A operação é realizada em quatro turno durante o dia sendo dois de eles banco quente (troca do turno dentro da mina).

A mina subterrânea em operação possui um sistema informatizado de despacho da operação de mina, adaptado a uma operação subterrânea, onde consegue controlar/programar e direcionar/alocar os equipamentos e os frentes do serviço. O pessoal encargado do despacho tem as seguintes funções:

- Receber as informações da mina e dos equipamentos do turno em que termina a jornada de trabalho;
- Elaborar a programação turno a turno utilizando-se das informações recebidas;
- Seguir o planejamento operacional e as prioridades estabelecidas pela engenharia;
- Controlar, no programa, as operações dentro da mina, alimentado dos dados atualizados recebidos da operação;
- Controlar as atividades executadas na mina via rádio, visando a segurança e a otimização de utilização das frotas e das equipes;
- Controlar as atividades dos mecânicos, determinando as prioridades de manutenção;
- Emitir relatórios básicos de produção.

O programa é alimentado mediante a digitalização manual dos registros diárias dos operadores, que são preenchidos durante a operação das atividades, onde os operadores detalham todos os eventos durante o turno e as respectivas horas (horas

produtivas, horas produtivas não gerenciáveis, horas produtivas gerenciáveis, horas em manutenção corretivo/preventivo). Com este banco de dados atualizados, consegue-se gerar os indicadores de produção tanto da mina, quanto de sua manutenção e planejamento.

3.2 Necessidades existentes na mina

O caso de aplicação inicia-se a partir da identificação dos desafios e das necessidades das três áreas (planejamento, operação e manutenção) envolvidas para o levantamento dos requisitos que devem contemplar o novo programa de despacho, para ter uma maior confiabilidade dos dados existentes, assim como um melhor gerenciamento dos recursos e tomada de decisões. Além disso, há desafios nesta integração.

Para esta etapa, foram elaboradas reuniões com as áreas de planejamento, manutenção e operação, a fim de se realizar o levantamento das necessidades de cada uma e o que o novo sistema do despacho deveria conter. São elas:

1. Escolher um sistema de despacho para gerenciar tarefas e monitorar sua conclusão. Isso permite atualizações de tarefas em tempo real, mudança ou designação automática das mesmas. As tarefas podem ser até mesmo designadas com base no local e conclusão de uma tarefa anterior, para, assim, acompanhar a situação atual de cada trabalho dentro da mina. Contabilizar o aumento da eficiência ao designar o veículo mais próximo ou a tarefa mais próxima que seja prioridade. As designações das tarefas melhorarão significativamente a eficiência global e a utilização dos equipamentos;

2. Sistema que aumenta a eficiência e reduz as perdas de tempo através do acompanhamento, controle e otimização de operações de minas subterrâneas. O plano de curto prazo pode ser importado no sistema, e o mesmo monitora a sua execução pela captura dos dados de produção e situação atual das atividades de todos os equipamentos de mina. Na sala de controle e com acesso a todos os dados da operação, o despachador pode definir melhores

alocações de equipamentos nas frentes de trabalho, resultando em menor tempo de espera entre atividades subsequentes nos ciclos operacionais da mina. Através do monitoramento do cumprimento do plano de curto prazo pelos despachadores e supervisores, pode-se comparar, em tempo real, os dados planejados e realizados, aumentando a aderência que gera um impacto positivo na previsibilidade da operação e na redução de custo. Além disso, permite que as informações geradas pelo sistema possam ser acessadas por outras aplicações (de terceiros) ou aplicações específicas como, por exemplo, dispositivos móveis. Costa e Ganga (2010) comentam que a implementação do sistema de despacho de caminhões configura-se como um melhor controle das máquinas da planta de processo. Após a implementação de um sistema de despacho, o usuário terá relatórios em mãos, com as facilidades que o sistema oferece. Por meio destes relatórios, o gestor da frota pode atuar de forma estratégica e imediata, sem deixar que nenhuma informação seja desconsiderada;

1. Contar com um sistema amigável e que possua uma linguagem de fácil compreensão. O uso da tecnologia 3D também é uma vantagem que o deixou mais eficiente, agilizando as operações com sofisticação e tranquilidade;

2. Facilitar a localização dos “gargalos da produção” e implementação de melhorias, principalmente, nos processos de transporte, desenvolvimento e produção;

3. Exportar gráficos e relatórios no programa Excel; as informações obtidas através dos relatórios deverão ser armazenadas no computador de bordo, juntamente com os dados do equipamento e do operador, sendo enviadas em tempo real para a sala de controle. Caso algum item crítico seja apontado como não conforme para operação, será gerado um alarme para avisar ao operador que ele não deverá operar o equipamento por motivo de segurança. Assim, o controlador acessará relatórios e informações, avaliando as situações, de modo que possa tomar decisões em conjunto com a equipe de manutenção e planejamento;

4. Identificar operadores em cada equipamento e armazenar informações de horas no equipamento, horas trabalhadas, treinamentos realizados, exames médicos, paradas e dados de telemetria, bem como enviar alarmes em caso de dados fora do padrão;

5. Programação do tempo de espera definido pelo usuário como aceitável para filas de carregamento/descarregamento e transporte, de forma que todas as anormalidades, a partir deste tempo, gerem alarmes e sejam armazenadas em banco de dados para geração de relatórios;

6. Medição de KPIs dos equipamentos móveis: o sistema deverá enviar informações em tempo real;

7. Produtividade: indicado em m/h para perfuratrizes, t/h LHD e caminhões (como tonelada quilometro por hora, para determinação de rotas de extração), pontos de batimento para *scaler*, tirantes por hora e por tamanho, m/h de cabos instalados, etc.;

8. O sistema deverá determinar o ritmo de lavra de cada frente para atender aos objetivos de qualidade e produção, além de acompanhar o volume de produção, calcular o ritmo de produção e comparar com metas estabelecidas;

9. Utilização: apontar horas com equipamento ligado ou desligado sem atividade indicando o motivo (fila, falta de atividade apontada, atraso de equipamento, transporte para outro local, troca de turno, liberação de atividades, falta de operador, etc.);

10. Disponibilidade física: apontar tempo de paradas na manutenção com código para identificar o tipo de problema apontado pela operação e permitir acompanhamento dos estados dos equipamentos;

11. Telemetria: indicar principais variáveis e alarmes de operação e manutenção como corrente, potência utilizada, temperatura, rotação, utilização de freios, vibração, marcha, etc. Esse módulo deverá permitir indicação de alarmes, a

integração com sistema de monitoramento remoto de ativos, bem como guardar dados para análises. Ter uma opção de telemetria nos equipamentos gera maior controle e economia de tempo como, por exemplo:

- Economia de Diesel; a telemetria fornecerá facilidade de controle dos possíveis desperdícios dos equipamentos durante o processo bem como das falhas mecânicas que o veículo possa apresentar. É importante frisar que o fornecimento de todas essas informações é dado a partir de relatórios mensais de consumo;

- Com o sistema de telemetria, é possível a obtenção de um histórico de desempenho e falhas recorrentes que geram gastos em dinheiro como em tempo dentro da operação. É possível também realizar o levantamento de uma previsão de paradas e de reparos dos equipamentos, além de uma análise do desempenho da oficina ou mecânico e a previsão de custos de investimento;

- Gerenciamento e controle de itens mecânicos e peças sobressalentes: a partir da telemetria é possível monitorar/definir os itens como maior desgaste dentro da produção assim como o desempenho de cada um dos componentes e sua preservação;

12. Distâncias médias de transporte e tempos das atividades, incluindo manobras, paradas, filas e ciclos, bem como segregar para equipamento com e sem carga;

13. A possibilidade de o aplicativo funcionar em dispositivos móveis como smartphones e tablets comunicando via WiFi;

14. Monitoramento da operação da mina, do posicionamento e da utilização de cada equipamento em tempo real, indicando locais de carga, descarga e perfuração e distâncias médias de transporte e tempos das atividades, incluindo manobras, paradas, filas e ciclos;

15. Acesso a informações básicas como locais de trabalho, planos de lavra, perfuração, etc., previamente inseridas no sistema por meio de telas de cadastros ou de importações; criação de tarefas pelos usuários que serão enviadas diretamente para o computador de bordo; monitoramento e apoio nas tomadas de decisões sobre o uso da frota, garantindo os níveis adequados de produtividade e disponibilidade em uma ação rápida e pontual;

16. O sistema deverá avaliar, de forma dinâmica, a quantidade de caminhões designada para carregamento em cada LHD disponível, de forma a maximizar a produtividade do sistema, indicando o número adequado de máquinas, evitando filas e tempos ociosos, e simulando tempo de passagem entre os veículos no percurso subterrâneo;

17. O sistema deverá avaliar a distribuição dos equipamentos de forma dinâmica e, em caso de indisponibilidade dos mesmos, recalcular e indicar o melhor cenário possível. Antecipar a necessidade de alocação de caminhões com base no tempo de viagem, de espera e de carregamento, e minimizar o tempo de transporte de minério pelos caminhões;

18. Contando com o auxílio das ferramentas, cada operador deverá realizar as atividades no início de seu turno de trabalho, verificando e validando todos os itens do *checklist*. Nesse momento, o operador poderá também registrar as não conformidades que encontrar. Dependendo do nível de gravidade da não conformidade, o equipamento poderá ser interditado para operação até que as falhas sejam corrigidas;

19. Controle dos turnos de trabalho da mina, seja de operação, de manutenção ou de outras equipes que façam parte do dia a dia da mina. Os turnos serão controlados juntamente com as equipes que serão associadas a eles, permitindo, inclusive, que o sistema controle de forma automatizada a programação de trabalho de cada equipe nos turnos;

20. Interface em que o controlador e os usuários da sala de controle possam monitorar as movimentações e produções realizadas pela frota de transporte.

Esta mesma interface poderá ser usada para ajustar incoerências e erros operacionais e realizar uma série de críticas nas informações geradas para que sejam validadas. Os ajustes poderão ser realizados pontualmente, modificando algumas variáveis dos apontamentos como origem, destino, material, dentre outros;

21. Ter o controle de todas as alocações de equipamentos, permitindo que o controlador designe os equipamentos para locais de trabalho específicos de acordo com o planejamento realizado.

3.3 Levantamento de Dados

Foi escolhido um setor da mina no qual se realizará o mapeamento de indicadores de produtividade e informação operacional para um levantamento da situação atual.

Para isto, realizou-se o levantamento dos quatro primeiros meses do ano, para verificar a situação atual da mina visando a realização do mapeamento de produtividade, bem como a utilização e a disponibilidade das principais frotas da mina, a saber: frota de *boltec*, jumbo, *scaler*, caminhão e LHD (ver figura 10).

Figura 10 – Frota de *boltec, scaler*, caminhão, jumbo e LHD.

Fonte: adaptado do *site*: https://www.epiroc.com/

Foram digitalizados os registros diários dos operadores dos primeiros 4 meses para, assim, ter-se um banco de dados das horas produtivas, horas em manutenção preventiva, manutenção corretiva, improdutivas gerenciáveis e não gerenciáveis de todas as frotas principais para um levantamento atual. O processo de levantamento de dados está especificado nas figuras 11 e na tabela 1.

Figura 11 - Processo de digitalização dos registros diários no banco de dados.

Fonte: elaborado pela autora.

Tabela 1 – Tabelas geradas a partir do banco de dados para análises.

Grupo de equipamento	Frota de jumbo
Turno	1,2,3,4
Ano	2019
Mês	Março

Grupo de equipamento	Frota de jumbo
Turno	1,2,3,4
Ano	2019
Mês	Março

Dia	Horas improdutivos gerenciáveis (h)	Horas improdutivos não gerenciáveis (h)	Horas em manutenção corretiva (h)	Horas em manutenção preventiva (h)	Horas operando a 50% capacidade (h)	Horas produtivas (h)	Horas totais geral (h)
1	30,6	7,0	10,1	43,9	6,3	22,0	120,0
2	23,7	7,7	29,1	35,3	4,0	20,2	120,0
3	12,8	4,2	42,1	36,0	8,7	16,2	120,0
4	4,3	10,6	25,1	41,8	2,3	35,8	120,0
5	18,6	7,6	23,2	48,0	1,5	21,0	120,0
6	28,3	9,3	10,8	35,9	2,1	33,6	120,0
7	58,3	5,1	18,1	18,2	2,3	18,1	120,0
8	36,7	6,7	21,5	17,8	5,8	31,5	120,0
9	34,3	9,5	34,6	5,8	3,4	32,3	120,0
10	39,5	6,9	32,8	6,2		34,7	120,0
11	36,0	8,1	34,7	5,8	1,9	33,5	120,0
12	38,8	7,1	21,4	5,8	12,4	34,4	120,0

Dia	Metros perfurados (m)
1	2902
2	2053,4
3	2290,4
4	3958,8
5	2155,9
6	2623
7	1853,3
8	2489,7
9	2679,2
10	3121,8
11	3263,7
12	3177,7

Fonte: elaborado pela autora.

3.4 Processamento de Dados

Foram processados os dados das frotas principais para comparar as metas que a unidade mineira tem atualmente. Os ganhos potências foram estimados, pela equipe de projeto da mineração, em 5% sobre as metas de 2019.

- $Disponibilidade(\%) = \frac{Horas\ Calendario\ Totais - Horas\ Manutenção}{Horas\ Calendario}$

- $Utilização\ (\%) = \frac{Horas\ Produtivas}{Horas\ Calendario\ Totais - Horas\ Manutenção}$

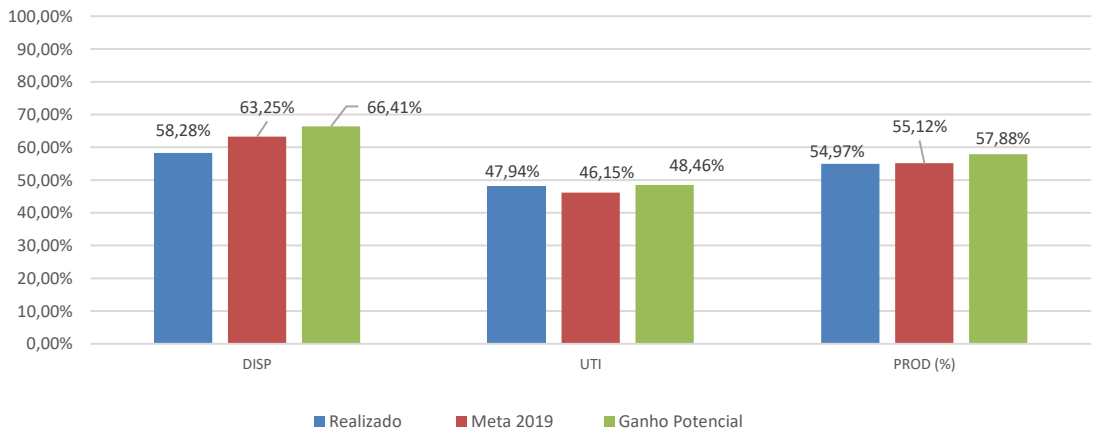
- $Produtividade\ (\%) = \frac{Produtividade}{Target\ de\ Produtividade}$

$A\ produtividade\ e\ o\ Target\ \ poderá\ ser\ medida\ em: \frac{t}{h}\ ou \frac{m}{h}\ dependendo\ da\ frota\ em\ avalição$

- $OEE\ (\%) = Disponibilidade\ (\%)\ \times Utilização\ (\%) \times Produtividade\ (\%)$

Na figura 12, observa-se o levantamento da média de utilização, disponibilidade e produtividade da frota de jumbo dos primeiros 4 meses do presente ano (2019).

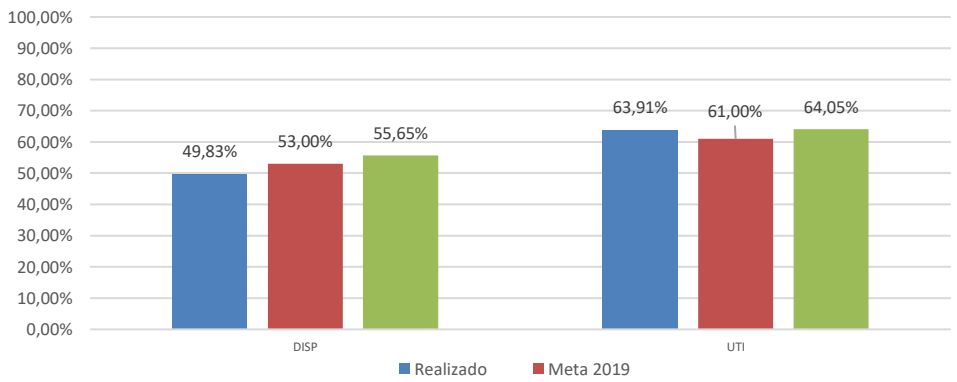
Figura 12 – Levantamento da média de dados da frota de jumbos.



Fonte: elaborado o pela autora.

Na figura 13, por sua vez, observa-se o mesmo levantamento da frota de *scalers* dos primeiros 4 meses do presente ano (2019), levando em consideração que a produtividade não é medida atualmente.

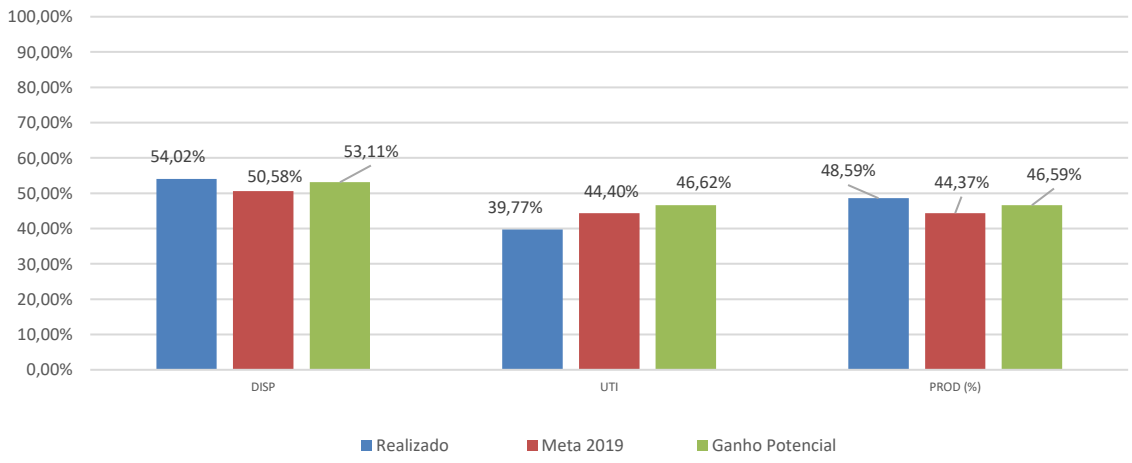
Figura 13 - Levantamento da média de dados da frota de *scalers.*



Fonte: elaborado pela autora.

Na figura 14, observa-se o mesmo levantamento da frota de *boltecs* dos primeiros 4 meses do presente ano (2019).

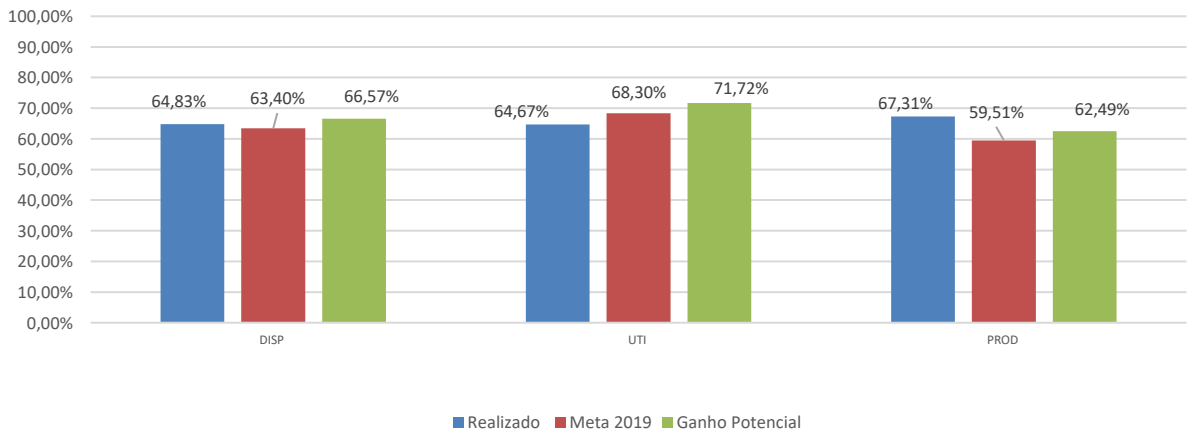
Figura 14 - Levantamento da média de dados da frota de *boltecs.*



Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 15, observa-se o mesmo levantamento da frota de caminhões dos primeiros 4 meses do presente ano (2019).

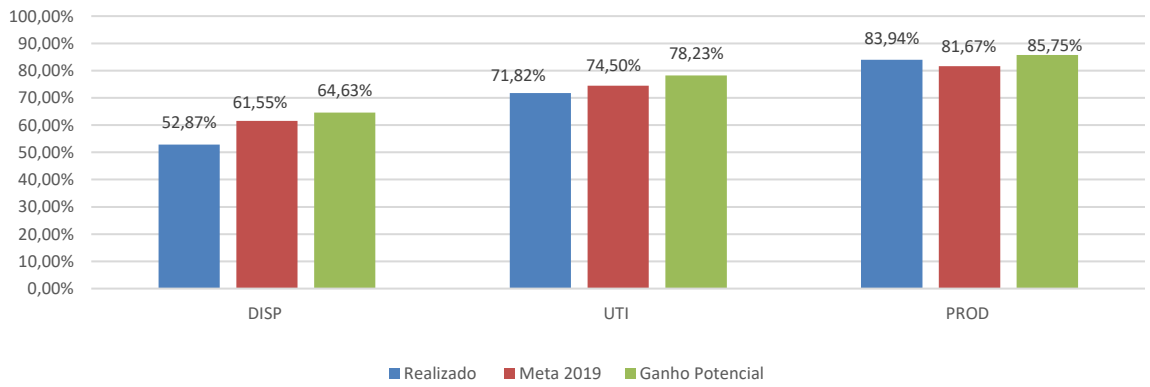
Figura 15 - Levantamento da média de dados da frota de caminhões.



Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 16, por fim, observa-se o mesmo levantamento da frota de LHD dos primeiros 4 meses do presente ano.

Figura 16 - Levantamento da média de dados da frota de LHDs.



Fonte: Elaborado pela autora.

3.5 Simulação Estimativa Pós-Intervenção

Nesta etapa, foi utilizada a Técnica de Simulação Dinâmica. Foram utilizando os dados coletados da operação da mina, sendo que os mesmos foram tratados e analisados, gerando distribuições estáticas para cada variável. Foi utilizado como dados de entrada as capacidades, indicadores operacionais e jornadas de trabalho dos equipamentos mais críticos da operação, conforme tabelas 2 ,3 e 4 levantados em campo. O software empregado foi o Arena, sendo que foi considerado um cenário onde há integração total entre as equipes, representando a implementação de um sistema de controle integral teórico (sem erros).

Tabela 2 – Nº de equipamentos por frota a ser simulada.

Equipamentos	Nº de Equipamentos
Jumbos	5
Boltec	4
Scaler	5
LHD	4

Fonte: elaborado pela autora.

Tabela 3 - Tempo de serviço por frente e desvio padrão por frota de equipamentos.

Equipamentos	Tempos de Serviço por Frente (h)	Desvio Padrão
Jumbos	2,50 h	1,20
Boltec	2,00 h	1,74
Scaler	2,00 h	1,00
LHD + Caminhão	4,17 h	1,94

Fonte: elaborado pela autora.

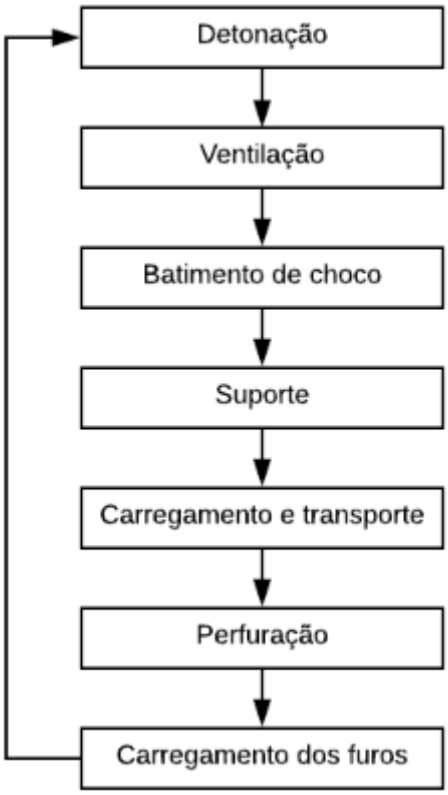
Tabela 4 – Média de Horas trabalhadas por frota total de equipamentos por dia.

Equipamentos	Horas Trabalhadas Média por Frota por dia (h)
Jumbos	31,93 h
Boltec	20,62 h
Scaler	38,21 h
LHD + Caminhão	36,45 h

Fonte: elaborado pela autora.

A mina em simulação está programada para realizar dois desmontes por dia. O primeiro acontece à 1,00 h e, logo em seguida, tem-se uma hora de pausa para ventilação. O batimento de choco é realizado pelo *scaler* e tem duração média de 2,00 h, com desvio padrão de 1,00 h. A sustentação das paredes e do teto da galeria é feito pelo *boltec*, que permanece em atividade por 2,00 h (desvio padrão de 1,74). A limpeza é feita pelo sistema LHD + Caminhão e dura, em média, 4,17 h com desvio de 1,94 h. O jumbo leva em torno de 2,50 h (desvio padrão de 1,20) para fazer os furos da próxima frente de trabalho. O carregamento dos furos com explosivos é feito por uma equipe de *blaster* e tem média de 2,00 h. Por fim, tem-se o segundo fogo do dia, como se pode observar na figura 17, onde se vê o ciclo de produção. O ciclo se repete por 120 dias.

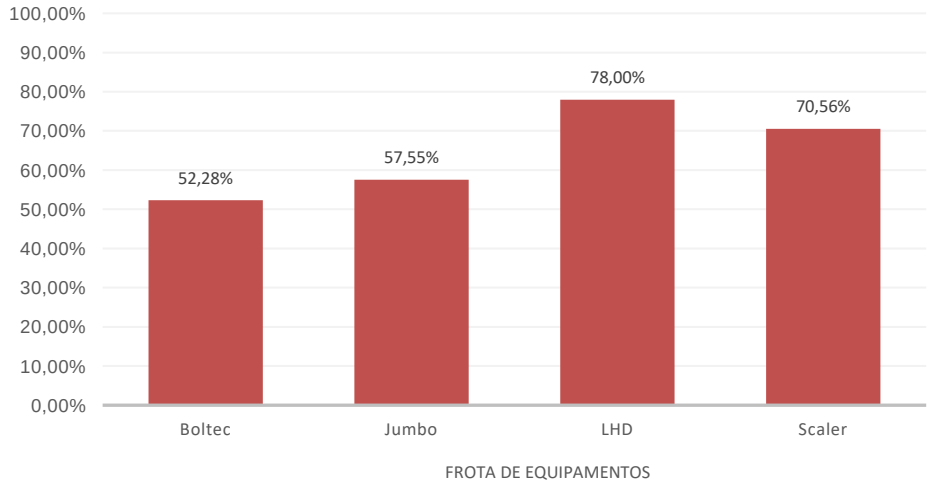
Figura 17 - Ciclo de produção.



Fonte: elaborado pela autora.

Assim, foram executadas 100 replicações para determinar um intervalo de confiança, baseado nos resultados fornecidos. Cada replicação representa a porcentagem de utilização dos equipamentos, sendo que são apresentados apenas as médias das 100 replicações, que pode ser observado na figura 18 e na tabela 5.

Figura 18 – Média de Utilização das frotas totais de *boltecs*, jumbos, LHDs e *scalers* pós-intervenção.



Fonte: elaborado pela autora.

Tabela 5 - Utilização média da frota pós-intervenção.

	Boltec	Jumbo	*Scaler*	LHD
Número médio de frentes por dia	6,87	6,38	9,51	5,20
Utilização média da frota	52,28%	57,55%	70,56%	78,00%

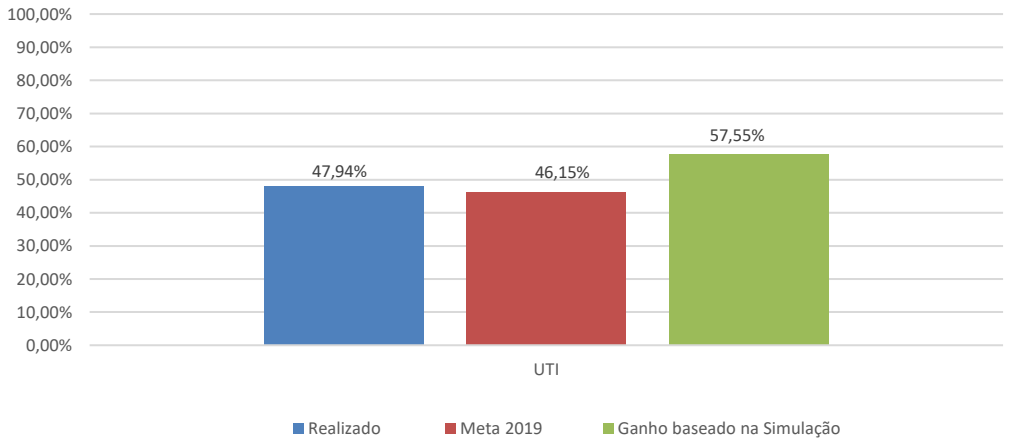
Fonte: elaborado pela autora.

4 ANÁLISES E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

Nesta seção, analisaremos os dados gerados do levantamento do cenário atual da mina com os resultados obtidos através do simulado de um cenário pós-intervenção de cada frota que foi analisada.

A figura 19 apresenta o ganho de 20% na utilização da frota do jumbo em relação ao realizado atualmente.

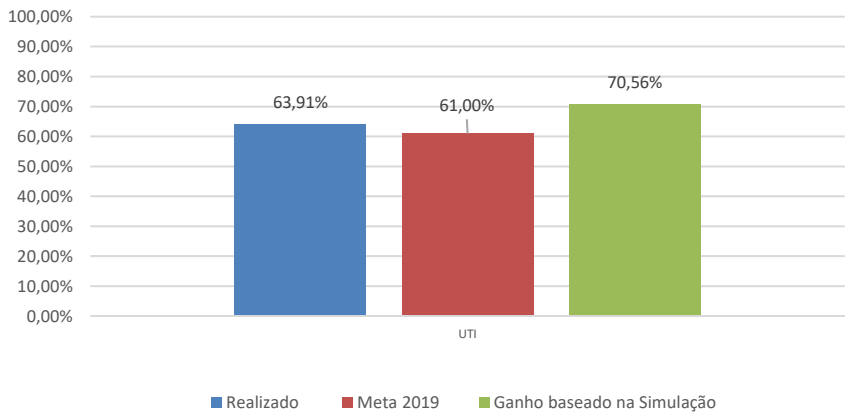
Figura 19 - Análises de dados da frota de jumbos em % de utilização média.



Fonte: elaborada pela autora.

Já a figura 20, representa o ganho de 10% na utilização da frota de *scaler* em relação ao realizado atualmente.

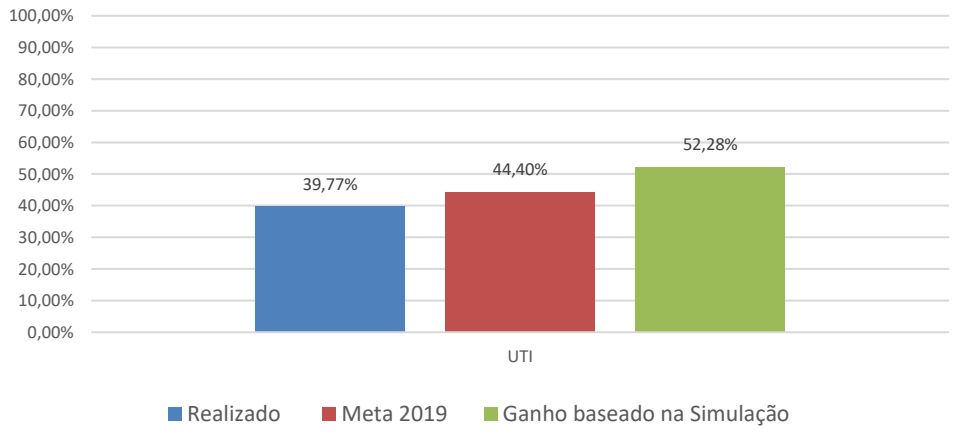
Figura 20 - Análises de dados da frota de *scalers* em % de utilização média.



Fonte:elaborado pela autora.

A figura 21, por sua vez, ilustra o ganho de 31,5% na utilização da frota de *boltec* com relação ao realizado atualmente.

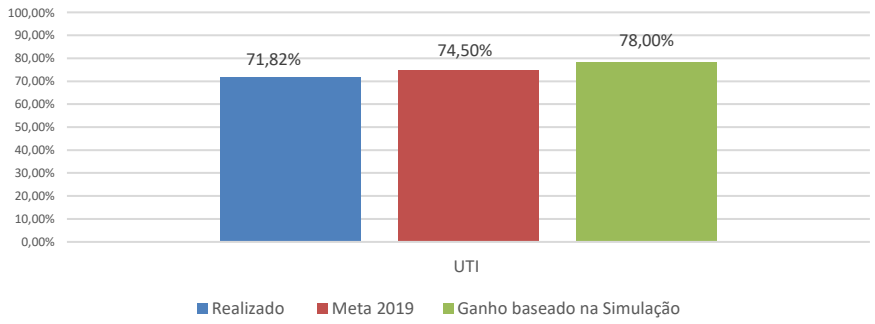
Figura 21 - Análises de dados da frota de *boltecs* em % de utilização média.



Fonte: elaborada pela autora.

Por último, a figura 22 representa o ganho de 9% na utilização da frota de LHD com relação ao realizado atualmente.

Figura 22 - Análises de dados da frota de LHDs em % de utilização média.



Fonte: elaborada pela autora.

Estes resultados nos permitem concluir que as implementações apresentam um ganho teórico em relação à utilização dos equipamentos, o que reflete em uma maior quantidade de horas produtivas em um cenário onde esteja implementado um sistema de controle que permita ter uma melhor tomada de decisões durante a operação.

O ganho estimado do projeto por parte da empresa mineira avaliada foi, inicialmente, de 5%[7]. Sendo assim, teríamos um ganho máximo teórico estimado entre 9,0% e 31,5%, como pode-se observar na tabela 6. Estes valores são maiores que a expectativa que se teve no início do processo de implementação de um sistema de despacho robusto.

Tabela 6 - Ganho médio por frota de equipamentos total avaliada.

Equipamentos	Nº de Equipamentos	% Ganhos Estimados
Jumbos	5	20,0%
Boltec	4	31,5%
Scaler	5	10,0%
LHD	4	9,0%

Fonte: elaborada pela autora.

Os resultados da simulação dinâmica apresentam um ganho máximo teórico considerando a integração perfeita (sem erros) entre as equipes, ao considerar um sistema de controle perfeito.

[7] Expectativa do ganho do projeto na implementação do sistema do despacho levantado analisado pela área de projetos da empresa mineira para tornar viável o projeto.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados obtidos no estudo realizado quantificam os benefícios da implementação de um sistema integrado de informações nas atividades de operação de uma mina subterrânea em operação. O gerenciamento integrado das informações das áreas de planejamento, manutenção e operação da mina estima o potencial de ganhos de produtividade na mina subterrânea estudada, por meio do aumento da utilização dos equipamentos. Os ganhos potenciais do sistema integrado foram estimados por meio de um modelo de simulação dinâmica que quantificou os indicadores de produtividade num cenário com gestão integrada de planejamento, manutenção e operação de lavra.

As principais conclusões desta pesquisa são descritas a seguir:

- Com a implementação de um sistema que integre as principais informações das áreas que mais interagem ao longo de uma operação, será possível ter uma melhor tomada de decisões e um melhor direcionamento das tarefas durante a operação, com o intuito de maximizar o uso dos equipamentos para atingir as metas de produção e de ganho na produtividade;

- Trabalhar com um único banco de dados se torna uma fonte de informação mais robusta e confiável, já que vem sendo alimentada corretamente, eliminando, assim, dados gerados por fontes alternas que se confundem no momento de análises dos processos envolvidos;

- Ao ter uma mesma fonte de dados conseguiremos controlar, analisar e realizar uma crítica mais objetiva dos KPIs das áreas de manutenção, planejamento e operação, com o propósito de encontrar melhorias nos processos para aumentar a produtividade;

- Durante a operação, um sistema integrado permite uma visão mais holística das informações de manutenção, planejamento e operação para a melhoria da tomada de decisões durante os turnos;

- Junto ao sistema de controle é possível observar os gargalos operativos com mais clareza, ajudando, assim, a elaborar planos ou realizar contingências para os mitigarmos e eliminarmos;

- Pode-se observar, com base na simulação, os ganhos na utilização dos equipamentos que estão vinculados diretamente a um aumento de suas horas trabalhadas. Sendo assim, temos uma melhoria nas decisões durante a execução, com o intuito de reduzir as horas improdutivas gerenciáveis destes equipamentos. Com o uso máximo dos recursos, será possível ter informações atuais tanto de planejamento quanto de manutenção para um melhor direcionamento das atividades dos equipamentos;

- A simulação permite ter uma visão dos possíveis cenários (mudança de comportamento operacional) e dos ganhos da implementação de um sistema integrado na operação do dia a dia;

- O uso de tecnologias de sistemas de integração, como o sistema apresentado neste trabalho, é um avanço muito importante para ser aplicado em mineração subterrânea. Sobre essa aplicação de tecnologias de sistema de integração em mineração subterrânea, se espera que, apesar das dificuldades de um ambiente de trabalho como o subsolo, essa aplicação possa, em algum momento, ser possível na maioria das mineradoras, como é feito atualmente em minas a céu aberto, tendo em vista o ganho na produção de uma mina;

Para continuidade da presente pesquisa, recomenda-se que sejam realizados levantamentos em campo para a aferição dos resultados obtidos depois da implementação de um novo sistema de controle, com o intuito de comprovar os impactos nos indicadores de produtividade da mina estudada na presente pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOTTER, R. C. **Tratamentos de Dados em Modelos de Simulação Discreta**. 147f. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

BURGER, D. J. Integration of the mining plan in a mining automation system using stateof-the-art technology at De Beers Finsch Mine. **The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy**, vol. 106, p. 553-560, 2006. Disponível em: <https://www.saimm.co.za/Journal/v106n08p553.pdf>. Acesso em: 25 mai. 2018.

CAMPELO, A. C. M. M.; MARIN, T.; DE TOMI, G. F. C. Utilização de dados do sistema de despacho para estimativa de produtividade de transporte no plano de lavra de curto prazo. In: **ABM Week 2017,** 2017, São Paulo. Disponível em: < http://dx.doi.org/10.4322/2176-1523.1560>. Acesso em: 21 mai. 2018.

CHWIF, L.; MEDINA, A. C. **Modelagem e Simulação de Eventos Discretos**: Teoria e Aplicações. 1. Ed. São Paulo: Bravarte, 2006. v. 1 . 255 p.

COSTA, F. V. **Análise dos principais indicadores de desempenho usados no planejamento de lavra.** 2015. 98 p. Dissertação (Mestrado). Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015.

COSTA, B.; GANGA, G. M. D. Benefícios da implantação de um sistema de despacho: estudo de caso em uma empresa de mineração. In: **XXX Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, São Carlos, 2010. Disponível em: <http://abepro.org.br/biblioteca/enegep2010_TN_STP_113_741_15857.pdf>. Acesso em: 21 mai. 2018.

CREMONESE,D.T.;LIVORATTI,P. **Simulation Tools: a study of application at the Nouadhibou Port.** 7Th International Conference on Intelligent Processing and Manufacturing of Materials. Foz do Iguaçu, PR, Brasil. 2012.

CREMONESE, D. T. **Desenvolvimento e aplicação de tecnologia para estudos de simulação dinâmica na cadeia do minério de ferro.** 2014.159 p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

ÇETIN, N.. **Open pit truck/shovel haulage system simulation**. Tese de doutorado, School of Natural and Applied Science of Middle East Technical University, 2004

KELTON, D. W; SADOWSKI, R. P; ZUPICK. B. N. **Simulation with ARENA**. 6. ed. McGraw-Hill, 2015.

MARIN, T. **Impacto da variabilidade operacional na execução do plano de lavra**. 88 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

MIYAGI, P. E. **Introdução a Simulação Discreta**. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2002.

NADER, B.; DE TOMI, G.; PASSOS, A. O. Indicadores-chave de desempenho e a gestão integrada da mineração. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, vol. 65, n. 4, p. 537-542, out./dez. 2012.
Disponível em: <http://www.producao.usp.br/handle/BDPI/34538>. Acesso em: 21 mai. 2018.

NADER, B.; SACHS, P. F. T. **Sistemas de gestão da produção e a cadeia de valor mineral.**
Disponível em: < http://brasilminingsite.com.br/anexos/artigos/33_0.pdf>. Acesso em: 21 mai. 2018.

PINTO, E. B. **Despacho de caminhões em mineração usando lógica nebulosa, visando ao atendimento simultâneo de políticas excludentes**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2017.

PANAGIOTOU, G. N. Discrete mine system simulation in Europe. **International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment**,13, p. 43-46, 1999.

PORTER, M. E.; MILLAR,V. How Information gives you competitive advantage. **Harvard Bussiness Review**, v. 63, p.149-160, July/Aug 1985.

PRADO, D. S. **Teorio das Filas e da Simulação**. Belo Horizonte; Nova Lima: Desenvolvimento Gerencial: INDG Tecnologia e Serviços, 2014.

REIS, M. Revisão: CICCO, F. **Desmitificando os SIGS - sistemas integrados de gestão.** Informe reservado, nº 48, 2005. Disponível em: <https://www.qsp.org.br/biblioteca/desmitificando.shtml>. Acesso em: 01 julho 2019.

ROBINSON, S. **Simulation: the practice of model development and use**. England: John Wiley & Sons, 2004.

SAAYMAN, P., CRAIG, I. K., CAMISANI-CALZOLARI, E. Optimization of an autonomous vehicle dispatch system in an underground mine. **Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy**, 106:2, 77-86, 2006.

SCHLEISS, D. **Integrated operations for maximizing results**. In: COM 2014 - Conference of Metallurgists Proceedings, Texas, 2014.

SHORT, K.; MIELLI, F. New trends for an integrated mining control system. In: **SME ANNUAL MEETING**, 2012, Seattle. Disponível em: <http://toc.proceedings.com/15118webtoc.pdf>. Acesso em: 21 mai. 2018

SOUSA, M. C.; RESENDE, P. C.; BRITO, J. N. A utilização de um sistema de erp no setor de mineração: estudo de caso. In: **XXXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, Salvador, 2013. Disponível em:

<http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2013_tn_sto_177_009_22886.pdf>Acesso em: 21 mai. 2018.

STURGUL, L. R. **Modeling and Simulation in Mining – Its Time Has Finally Arrived.** Simulation: Transactions of The Society for Modeling and Simulation International, v. 76, n. 5, p. 286 – 288, Maio. 2001.

DE TOMI, G. Mina do futuro terá gestão sistêmica. **VALE**. Disponível em: <http://www.vale.com/brasil/PT/initiatives/innovation/mais/Documents/vale_revista-mais_digital_por_minao.pdf>. Acesso em: 21 mai. 2018.

TUAZON, D. et al. A practical and rigorous approach for the integration of sustainability principles into the decision-making processes at minerals processing operations. **Minerals Engineering,** Elsevier, v. 29, p. 65-71, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0892687511003980>. Acesso em: 21 mai. 2018.

TU, J. H., HUCKA, V. J. Analysis of open pit truck haulage system by use of a computer model. **CIM bulletin**, 78: 879, p. 53-59, 1985.

TURNER, R.J. Simulation in the mining industry of South Africa. **International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment**, 13, 47-56, 1999.

REFERÊNCIAS CONSULTADAS

BAMBER, A. S. **Integrated mining, pre-concentration and waste disposal systems for the increased sustainability of hard rock metal mining.** 2008. 331p. Thesis (Doctor). University of British Columbia, Vancouver, 2008.

BATCHELOR, D.H. The implementation of a computerized truck dispatch system at Palabora. In: **Proceedings of the twentieth international symposium on the application of computers and mathematics in the mineral industries**. vol. 1: Mining. Johannesburg, 1987. p. 389-401.

BATTERHAM, R. J. The mine of the future – Even more sustainable. **Minerals Engineering,** Elsevier, v. 107, p. 2-7, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0892687516303739>. Acesso em: 21 mai. 2018.

BRITTON, M.; HODKIEWICZ, M.; KEFFORD, A. Energy efficiency metrics in mine design**. In: CEED seminar proceedings**, Crawley, 2012.. Disponível em: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.682.5618&rep=rep1&type=pdf>. Acesso em: 21 mai. 2018.

DIAS, S. M. P.; PINTO, E. E. A utilização de um sistema de informação na tomada de decisões em uma empresa mineradora em minas gerais. In: **XXXI Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, Belo Horizonte, 2011. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2011_TN_STO_142_898_18792.pdf>. Acesso em: 21 mai. 2018.

DYER, T. L. Simulation modeling validates load and haul requirements at Cortez Gold Mines. **Minning Engineering**, vol. 59, n. 1, p. 39-43, 2007. Disponível em: <http://me.smenet.org/abstract.cfm?preview=1&articleID=1307&page=39>. Acesso em: 25 mai. 2018.

ELBRONDA, J.; SOUMIS, F. Towards integrated production planning and truck dispatching in open pit mines. **International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment**, vol. 1, ISSUE1, 1987.

FELSCH J**.**, W. S. **Análise do desempenho dos operadores de equipamentos de mina e simulação de cenários futuros de lavra:**
Estudo de caso – mina casa de pedra – Congonhas/MG. 2015. 124 p. Dissertação (Mestrado). Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014.

FREITAS, S. et al. Simulation-based risk quantification: a reconciliation-based performance analysis. **Mining Technology**, New York, p. 1-8, janeiro 2017. DOI: 10.1080/14749009.2017.1278898.
Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/14749009.2017.1278898>. Acesso em: 21 mai. 2018.

FREITAS, S. B. M. **Planejamento estocástico de lavra: metodologias de simulação, otimização e gestão de risco para a mina do futuro.** 2015.181 p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

HARDY, R. J. **Integrated mining, pre-concentration and waste disposal systems for the increased ustainability of hard rock metal mining.** 2007. 598p. Thesis (Doctor). Western Australian School of Mines, Curtin University of Technology**,** Perth, 2007.

HARDY, R. J. Four-Pass Loading — Must-Have or Myth? In: **Fifth Large Open Pit Mining Conference**, Kalgoorlie, 2003. Disponível em: <https://www.ausimm.com.au/publications/epublication.aspx?ID=1252>. Acesso em: 21 mai. 2018.

HSU, N. **Data Quality of Fleet Management Systems in Open Pit Mining: Issues and Impacts on Key Performance Indicators for Haul Truck Fleets.** 2015. 146p. Thesis (Master). Queen’s University, Kingston, 2015.

ISOKANGAS, E. et al. Using process integration & optimization to provide integrated process solutions for mining operations, from mine to mill. In: **XXVI IMPC**, New Delhi, 2012. Disponível em:

<https://www.researchgate.net/profile/walter_valery/publication/310952503_using_process_integration_optimization_to_provide_integrated_process_solutions_for_mining_operations_from_mine_to_mill/links/583b707608aef00f3bfd8692/using-process-integration-optimization-to-provide-integrated-process-solutions-for-mining-operations-from-mine-to-mill.pdf>. Acesso em: 21 mai. 2018.

MAN, Y. T.; HUGHES-NARBOROUGH, C.; SMITH, M. P. The human factors in the success of mineral processing projects. **Minning Engineering**, vol. 68, n. 8, p. 36-41, 2016.

MIELLI, F. Three major mining challenges and their technological solutions. **Minning Engineering**, vol. 63, n. 9, p. 69-72, 2011. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/abc1/4b83c68feb7a5ead2db1edb2eeb9442e9eed.pdf>. Acesso em: 25 mai. 2018.

MUDULI, L.; MISHRA, D. P.; JANA, P. K. Application of wireless sensor network for environmental monitoring in underground coal mines: A systematic review. **Journal of Network and Computer Applications**, Elsevier, v. 106, p. 48-67, março 2018. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1084804517304368>. Acesso em: 21 mai. 2018.

NEL, S.; KIZIL, M. S.; KNIGHTS, P. **Improving Truck-Shovel Matching**. In: **35TH APCOM SYMPOSIUM**, 2011, Wollongong. Disponível em: <https://espace.library.uq.edu.au/view/UQ:254173>. Acesso em: 21 mai. 2018.

PAIVA, G. **Aplicação de tecnologias de informação e automação em minas subterrâneas: desafios e perspectivas.** 2016. 151 p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

RENSTRÖM, A. Productivity Enhancements to Increase Ore Production from 18 to 36 Mt at Aitik. In: **SEVENTH LARGE OPEN PIT MINING CONFERENCE**, Perth, 2010. Disponível em: <https://www.ausimm.com.au/publications/epublication.aspx?ID=5595>. Acesso em: 21 mai. 2018.

REUTER, C.; BRAMBRING, F. Improving data consistency in production control. **Procedia CIRP,** Elsevier, v. 41, p. 51-56, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827115011956>. Acesso em: 21 mai. 2018.

REUTER, C. et al. Improving data consistency in production control by adaptation of data mining algorithms. **Procedia CIRP,** Elsevier, v. 56, p. 545-550, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221282711631099X>. Acesso em: 21 mai. 2018.

SACHS, P. F. T. **Cadeia de valor mineral e tecnologia da informação: alinhamento estratégico como gerador de eficácia em empresas de mineração.**

2009. 169 p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

SCHUH, G. et al. Improving data integrity in production control. **Procedia CIRP,** New York: Elsevier, v. 9, p. 44-48, 2013. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827113004514>. Acesso em: 21 mai. 2018.

SCHUH, G. et al. Achieving higher scheduling accuracy in production control by implementing integrity rules for production feedback data. **Procedia CIRP 19,** Elsevier, v. 19, p. 142-147, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827114006313>. Acesso em: 21 mai. 2018.