



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



MATHEUS ANGELO NUNES

**IMPORTÂNCIA DO CONTROLE DE PERFORMANCE DOS EQUIPAMENTOS DE
CARGA E TRANSPORTE PARA O PLANEJAMENTO DE MINA**

OURO PRETO – MG

2021

MATHEUS ANGELO NUNES
matheusengminas@outlook.com

**IMPORTÂNCIA DO CONTROLE DE PERFORMANCE DOS EQUIPAMENTOS DE
CARGA E TRANSPORTE PARA O PLANEJAMENTO DE MINA**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito para a obtenção do título de Engenheiro de Minas.

Professor Orientador: DSc. Carlos Enrique Arroyo Ortiz

OURO PRETO – MG

2021

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

N972i Nunes, Matheus Angelo.
Importância do controle de performance dos equipamentos de carga e transporte para o planejamento de mina. [manuscrito] / Matheus Angelo Nunes. - 2021.
69 f.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Lavra de minas - Planejamento. 2. Minas e recursos minerais - Carregamento e transporte. 3. Caminhões. 4. Produtividade. I. Arroyo Ortiz, Carlos Enrique. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 622.68

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



FOLHA DE APROVAÇÃO

Matheus Angelo Nunes

Importância do Controle de Performance dos Equipamentos de Carga e Transporte para o Planejamento de Mina

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas

Aprovada em 25 de agosto de 2021

Membros da banca

Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz - Orientador(a) Demin - Universidade Federla de Ouro Preto
Dr. Adilson Curi - Demin - Universidade Federla de Ouro Preto
M.Sc. Walter Schmidt Felsch - WF Mining Analytics

Carlos Enrique Arroyo Ortiz, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em XX/XX/XXXX



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Enrique Arroyo Ortiz, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 05/06/2022, às 09:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0338468** e o código CRC **9971FOCC**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, por acreditarem no meu sonho e me apoiarem incondicionalmente durante toda a minha trajetória.

Agradeço a minha família por todo amor e carinho. Aos meus tios e tias que são meus exemplos profissionais.

À Universidade Federal de Ouro Preto, a Escola de Minas e ao DEMIN pelo ensino público gratuito e de qualidade.

À todos os meus amigos que permaneceram próximos apesar da distância física, obrigado por compreenderem a ausência.

À AngloGold Ashanti pela oportunidade dada.

À Júlia pelo apoio e carinho.

À querida mansão República Taranóia, seus moradores e ex-alunos pelos anos de companheirismo e aprendizagem que jamais serão esquecidos.

Não se gerencia o que não se mede, não se mede o que não se define, não se define o que não se entende, e não há sucesso no que não se gerencia.

(William Edwards Deming)

RESUMO

Os programas de produção têm como objetivo estabelecer metas de acordo com a capacidade de produção dos equipamentos e demais fatores inerentes da mineração. O controle dos índices de produtividade é essencial para a determinação da capacidade de produção desses equipamentos e auxiliam os profissionais na gestão das operações, mantendo-a aderente ao plano de lavra. Caminhões e escavadeiras representam, juntos, entre 60 e 80% do custo operacional da lavra de minas a céu aberto, o que justifica o acompanhamento dos apontadores operacionais destas duas etapas afim de gerir os gastos dessa etapa. O presente trabalho tem como objetivo, elencar os principais índices operacionais dos equipamentos de carregamento e transporte, considerando o par caminhão basculante e escavadeira hidráulica, por representar a modalidade mais usual na lavra de mina a céu aberto, avaliar a relevância desses índices, os principais fatores que provocam a variabilidade nos valores e verificar a importância desses indicadores para o planejamento de lavra de curto prazo de uma mina a céu aberto.

Palavras-chave: planejamento de lavra, índices operacionais, caminhões, escavadeiras.

ABSTRACT

The production programs aim to establish goals according to the production capacity of the equipment and other factors inherent to mining. The control of productivity rates is essential to determine the production capacity of this equipment and help professionals in the management of operations, keeping it adherent to the mining plan. Trucks and excavators represent, together, between 60 and 80% of the operational cost of open pit mining, which justifies the monitoring of the operational indicators of these two stages in order to manage the costs of this stage. The objective of this paper is to list the main operating rates of loading and transport equipment, considering the pair dump truck and hydraulic excavator, because it represents the most common mode in open pit mining, evaluate the relevance of these rates, the main factors that cause the variability in values and verify the importance of these indicators for planning short-term mining of an open pit mine.

Keywords: *mine planning, operational indexes, trucks, excavators*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Extração de minério em encosta	17
Figura 2 - Vista panorâmica das operações da mina Casa de Pedra - Congonhas (MG)	18
Figura 3 - Fluxograma de planejamento de lavra	20
Figura 4 - Custos Operacionais de Lavra	23
Figura 5 - Gráfico de controle	25
Figura 6 - Escavadeira Hidráulica Caterpillar Cat 6030	28
Figura 7 - Dragline Liebherr HS 8300	29
Figura 8 - Relação de compatibilidade de caminhões fora de estrada e escavadeiras hidráulicas	30
Figura 9 - Composição dos custos operacionais de transporte por caminhões	31
Figura 10 - Caminhão Caterpillar 793F CMD Autônomo	34
Figura 11 - Fluxograma de coleta e tratamento de dados dos equipamentos de mina	42
Figura 12 - Fluxograma simplificado da operação de uma mina a céu aberto	43
Figura 13 - Ciclo de operação do computador de bordo	44
Figura 14 - Computador de bordo para controle de frota	45
Figura 15 - Sistema de transmissão de dados	46
Figura 16 - Teste de normalidade para produtividade efetiva dos equipamentos de carga	49
Figura 17 - Teste de normalidade para a utilização dos equipamentos de carga	50
Figura 18 - Teste de normalidade para produtividade efetiva dos equipamentos de transporte	50
Figura 19 - Teste de normalidade para DMT	51
Figura 20 - Teste de correlação entre produtividade efetiva e planejada para equipamentos de carga	52
Figura 21 - Teste de correlação entre produtividade efetiva e planejada para equipamentos de transporte	52
Figura 22 - Teste de correlação entre DMT efetiva e planejada	53
Figura 23 - Ciclo de obtenção de dados e criação do plano de lavra	55

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: DMT (Distância Média de Transporte).....	36
Equação 2: Tempo de Ciclo das Escavadeiras.....	37
Equação 3: Tempo de Ciclo dos Caminhões.....	37
Equação 4: Disponibilidade Mecânica.....	38
Equação 5: Fator Utilização dos Equipamentos.....	38
Equação 6: Fator Rendimento (em função das horas trabalhadas efetivas e previstas).....	39
Equação 7: Fator Rendimento (em função da disponibilidade física e utilização do equipamento).....	39
Equação 8: Taxa de Produção.....	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores usuais para valor p	49
Tabela 2 - Níveis de significância para correlação	51
Tabela 3 - Cenário 1 para cálculo de frota de equipamentos	58
Tabela 4 - Cenário 2 para cálculo de frota de equipamentos	59
Tabela 5 - Cenário 2 para cálculo de frota de equipamentos	60

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	JUSTIFICATIVA.....	13
1.2	OBJETIVO GERAL	13
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	LAVRA DE MINA A CÉU ABERTO.....	15
2.2	PLANEJAMENTO DE LAVRA.....	18
2.3	CUSTOS OPERACIONAIS	21
2.4	MEDIÇÕES DE DESEMPENHO	23
2.5	DESPACHOS ELETRÔNICOS	25
2.6	CARREGAMENTO E TRANSPORTE	27
2.6.1	Equipamentos de carga.....	27
2.6.2	Equipamento de transporte.....	29
2.6.2.1	Vantagens do uso de caminhões.....	31
2.6.2.2	Desvantagens do uso de caminhões	32
2.6.3	Produtividade da frota dos equipamentos de carga e transporte.....	34
2.7	CONCEITOS FUNDAMENTAIS PARA ESTIMATIVA DE PRODUTIVIDADE DOS EQUIPAMENTOS.....	35
2.7.1	DMT (Distância Média de Transporte) global	36
2.7.2	Tempo de ciclo	36
2.7.2.1	Tempo de ciclo das escavadeiras.....	37
2.7.2.2	Tempo de ciclo dos caminhões	37
2.7.3	Fator Disponibilidade dos equipamentos.....	37
2.7.4	Fator Utilização dos equipamentos.....	38
2.7.5	Fator Rendimento.....	39
2.7.6	Taxa de produção	39
3	METODOLOGIA	41
3.1	ESTUDO DE CASO.....	41
3.1.1	Coleta e tratamento de dados.....	42
3.1.1.1	Computador de bordo.....	44
3.1.1.2	Compartilhamento de dados.....	46

3.1.1.3	Banco de dados.....	47
3.1.2	Análise estatística dos dados.....	48
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	54
4.1	CENÁRIO 1 (CONTROLE).....	58
4.2	CENÁRIO 2.....	59
4.3	CENÁRIO 3.....	60
	CONCLUSÃO.....	62
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	64

1 INTRODUÇÃO

A extração mineral a céu aberto é caracterizada por ser uma atividade de alto custo de investimento no qual o processo de tomada de decisão possui uma elevada complexidade. Para auxiliar nas tomadas de decisão é necessário que haja planejamento.

Planejar é prever o futuro e no caso do planejamento de mina, o plano de lavra deve se basear em estudos confiáveis, afim de garantir a sua implantação e desenvolvimento de maneira adequada e compatível com os recursos técnicos e econômicos disponíveis. Para suportar as flutuações de preços das commodities que correm com frequência, é necessário implantar um sistema eficiente de planejamento e controle, a fim de obter aumento na produtividade e redução dos custos de produção.

Para atender um mercado cada vez mais dinâmico e exigente quanto a qualidade do produto e aos valores socioambientais das empresas, a mineração evoluiu bastante nos últimos anos, principalmente quando se trata do controle de suas atividades. Com o advento da computação e da transmissão de dados em tempo real, é possível obter informações de todos os equipamentos dentro da mina de forma instantânea, avaliar o seu desempenho a partir de dados históricos, corrigir deficiências ou observar oportunidades para o crescimento da produção. Desta forma, a qualidade dos dados gerados é de extrema importância para gerir o empreendimento. Em todos as etapas da vida de uma mina é essencial acompanhar o desempenho dos setores produtivos por meio de índices que medem a eficiência de um processo (CAMPELO, MARIN, TOMI, 2018).

A estimativa de capacidade de produção e o dimensionamento de frota de caminhões e escavadeiras para cumprimento de um determinado volume, através de indicadores de produção específico é um recurso comum utilizado no planejamento de lavra.

O levantamento desses indicadores de forma incorreta ou imprecisa, tem como consequência a sub ou superestimativa da capacidade de produção, causando gastos adicionais para a empresa e/ou o não cumprimento de metas.

Esse estudo busca determinar os indicadores de produção mais adequados tanto para o controle das operações quanto para o planejamento de mina, visando a redução dos custos e desperdícios nas etapas do carregamento e transporte. Serão feitas algumas análises de sensibilidade desejando compreender como a variabilidade desses indicadores pode afetar a frota de caminhões e escavadeiras na produção.

1.1 JUSTIFICATIVA

As operações de carregamento e transporte são as mais críticas dentro dos processos de lavra, já que representam entre 60 e 80% dos custos operacionais de todo ciclo operacional. Estas operações impactam diretamente no desempenho econômico de uma mina, uma vez que envolve um alto custo de capital investido e um alto custo operacional. Dessa forma, se faz necessário o controle contínuo dos índices desses equipamentos a fim de minimizar as incertezas dos gastos dessas operações.

1.2 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo, elencar os principais índices operacionais dos equipamentos de carregamento e transporte, considerando o par caminhão basculante e escavadeira hidráulica, por representar a modalidade mais usual na lavra de mina a céu aberto, avaliar a relevância desses índices, os principais fatores que provocam a variabilidade nos valores e verificar a importância desses indicadores para o planejamento de lavra de curto prazo de uma mina a céu aberto.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para que o objetivo geral seja alcançado, traçaram-se os seguintes objetivos específicos:

- Discorrer sobre o ambiente da lavra a céu aberto e os custos operacionais envolvidos na produção;
- Discorrer sobre o planejamento de lavra e as fases que compreendem esse processo;
- Descrever sobre a coleta e transmissão dos dados obtidos em campo e o processo de transformação dos mesmos para a obtenção dos índices operacionais;
- Elencar os principais índices operacionais utilizados para o controle das atividades dos equipamentos de carregamento e transporte;

- Discutir como a ingerência desses índices pode influenciar na estimativa de capacidade produtiva da frota de equipamentos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 LAVRA DE MINA A CÉU ABERTO

Curi (2014) reafirma a teoria apresentada por Hartman e Mutmansky (2002) que diz que: a atividade de extração mineral é intrínseca a sociedade desde a pré-história. Em cada ciclo, os humanos utilizaram dos minerais para suprir as suas necessidades, desde a criação de ferramentas com o propósito de facilitar as suas atividades cotidianas e construir abrigos, para cunhar moedas e realizar câmbio ou ainda criar grandes máquinas e estruturas que compõe nosso estilo de vida atual. A evolução tecnológica na mineração acompanhou o desenvolvimento humano, de tal maneira que nos adaptamos a complexidade dos depósitos e desenvolvemos novas técnicas e ferramentas, afim de desenvolver uma atividade sustentável que permita suprir as nossas necessidades e as da próxima geração.

A mineração a céu aberto foi a precursora da extração de bens minerais e ela se deu essencialmente pela exploração de minérios de cobre, ferro, carvão, argila, cascalho e areia. (COSTA, 2015).

Atualmente, a indústria extrativa mineral tem como principal objetivo econômico a obtenção de lucros. Entretanto, essa indústria é caracterizada por visar o aproveitamento econômico de recursos naturais exauríveis e não renováveis. Desta forma, a realização de receita de um empreendimento está restrita a um período específico que é a vida útil da mina (CURI, 2014). Considerando essa natureza intrínseca dos recursos minerais, a mineração precisa promover a equidade intra e intergeração, isso significa na perspectiva da geração atual, é necessário minimizar seus impactos ambientais, e no contexto intergeracional, garantir o bem estar das gerações futuras (ENRÍQUEZ, 2009).

Segundo Curi (2014) a vida de uma mina pode ser dividida em cinco estágios: prospecção, exploração, desenvolvimento, exploração e recuperação. A fase de prospecção compreende trabalhos geológicos visando de reconhecer novos depósitos por meio de técnicas de análise aerofotométrica, sondagens e visualização simples do terreno afim de encontrar sinais típicos de acúmulo de determinados minerais. Na fase de exploração são definidas a extensão e o valor do corpo de minério, utilizando técnicas semelhantes à prospecção. O estágio do desenvolvimento constitui-se da abertura do depósito mineral. A exploração é a produção em larga escala do minério a ser extraído. Por último, a fase de recuperação consiste na

restauração da área utilizada pela mineração, desde a cava, as pilhas de estéril, barragens e afins, de forma a resgatar as características da fauna e flora originais da região.

A exploração mineral pode ser realizada tanto de forma a céu aberto quanto subterrânea.

Para Curi (2014) a lavra a céu aberto é justificável, tecnológica e economicamente, quando o mineral de interesse se situa próximo a superfície ou em profundidades moderadas. Para extrair o minério por um método a céu aberto, é necessário remover uma camada de rochas estéreis que cobre o depósito. Este processo recebe o nome de decapeamento. Se tratando dessa remoção, a quantidade de material a ser retirado não é a grandeza mais importante, a relação entre a quantidade de material a ser decapeado por unidade de minério extraído torna-se mais vultoso. Esta relação pode definir a exequibilidade de um empreendimento, pois o custo para este processo é relativamente alto. Tal relação tem um nome: relação estéril/minério (REM).

A lavra, onde os operadores e máquinas não estão expostos ao ambiente subterrâneo ou enclausurados é denominado lavra a céu aberto (PERONI, 2007). Segundo Curi (2014), nesse tipo de lavra, o corpo mineral é sempre explotado de forma descendente, ou seja, de cima para baixo e de forma planejada. Ainda segundo esse autor, os principais métodos de lavra a céu aberto são: a lavra por bancada, a lavra em tiras ou fatias e a lavra de pedreiras. Neste trabalho, será dada ênfase a lavra por bancadas, uma vez que é responsável pela grande maioria da exploração de minérios no mundo.

O método de bancadas consiste na construção de taludes descendentes consecutivos, até atingir os limites técnicos e econômicos do corpo mineralizado. O minério lavrado é enviado para a usina de beneficiamento e/ou estoques onde serão previamente armazenados e posteriormente beneficiados. O material de baixa qualidade ou que não será extraído é denominado estéril. Esse é depositado em pilhas próximas ao local de extração ou ainda dentro das próprias instalações da mina, de forma a não atrapalhar a operação, não cobrir minério ainda não explotado e possibilitando a recuperação ambiental da área. (CURI, 2014).

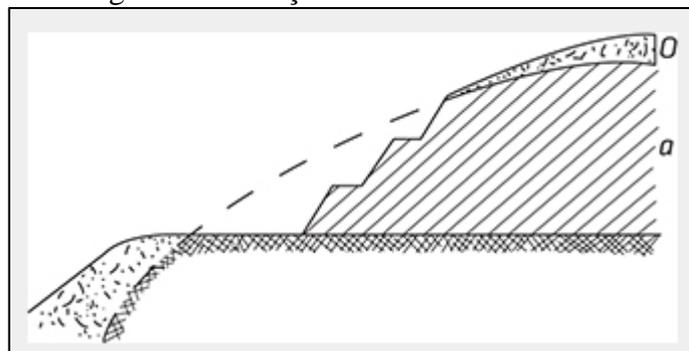
Esse método é aplicado principalmente em depósitos de grande extensão, mas apresenta boa flexibilidade, podendo ser empregado em depósitos menores. A resistência do material pode ser variada (PINTO E DUTRA, 2008).

Traçando um comparativo entre a lavra por bancadas a céu aberto e a lavra subterrânea, podemos citar algumas vantagens do primeiro método, como: a alta produtividade, principalmente devido ao fato de não haver restrições do peso e tamanho dos equipamentos, tal como na mineração subterrânea onde as vias são estreitas. A metodologia operacional por bancadas permite uma maior produtividade, menor custo, maior recuperação, melhor gestão de recursos, além de melhores condições de trabalho, quanto a segurança e salubridade (CURI,

2014) (PINTO E DUTRA, 2008). As várias frentes de minério com características distintas entre si, permitem uma maior flexibilidade, podendo haver uma mistura dos seus produtos afim de entregar para a planta de beneficiamento um material com as melhores especificações possíveis (PERONI, 2007).

Dando continuidade à análise dos métodos em questão, a principal desvantagem da lavra por bancadas frente a lavra subterrânea é quanto a profundidade do depósito, existindo uma barreira tecnológica para os equipamentos, além de limites econômicos determinados pela REM (Relação estéril/minério) (PERONI, 2007). Podemos citar também o alto custo referente ao transporte de materiais (CURI, 2014) e também a aquisição de equipamentos de grande porte com alto valor agregado (PINTO E DUTRA, 2008). Por último, mas não menos importante, podemos citar as intemperes climáticas que afetam diretamente na operação da mina além dos inconvenientes decorrentes do impacto ambiental gerado pelas aberturas superficiais (CURI, 2014). As figuras a seguir apresentam um corte vertical em um projeto de lavra a céu aberto e uma mina em operação na cidade de Congonhas – MG, respectivamente.

Figura 1 - Extração de minério em encosta



Fonte: Curi (2014)

Figura 2 - Vista panorâmica das operações da mina Casa de Pedra - Congonhas (MG)



Fonte: Curi (2014)

2.2 PLANEJAMENTO DE LAVRA

O planejamento de lavra deve ser executado de maneira cautelosa, de forma a minimizar os custos unitários, maximizar os lucros (HARTMAN E MUTMANSKY, 2002) além de observar as premissas da sustentabilidade econômica e social.

Planejar, é prever o futuro e no caso do planejamento de mina, o plano de lavra deve se basear em estudos confiáveis, com o objetivo de garantir a sua implantação e desenvolvimento de maneira adequada e compatível com os recursos técnicos e econômicos disponíveis. O conhecimento prévio da reserva mineral é imprescindível, por constituir a base de sustentação de todo empreendimento mineiro (CURI, 2014).

O maior desafio ao se realizar o planejamento de mina, é projetar a lavra e otimizar o sequenciamento de extração, de modo a assegurar a minimização da remoção de estéril, garantir a segurança necessária para a operação além de maximizar o valor presente líquido do minério lavrado (SILVA, 2008).

O planejamento contemplará a execução da exploração, ordenando as operações de mineração, e determinando o sequenciamento de extração da mina, para que com isso, a escala de produção desejada seja alcançada (SANTOS, 2015). Quando um plano de lavra é elaborado, espera-se que esse seja executado dentro de algumas premissas, das quais veremos algumas neste capítulo. Um plano mal ou não executado compromete as estratégias de longo prazo da empresa (COSTA, 2015).

Para Changanane (2017), alguns fatores devem ser considerados no planejamento e projeto da cava, dentre eles, os três principais que estão listados abaixo. Estes devem ser considerados como um todo, não havendo distinção de suas importâncias.

- Naturais e geológicos, como a topografia, características metalúrgicas, teores de minério, clima e ambiente;
- Econômicos como massa e teor do minério, custo operacional e investimento, taxa de produção e REM;
- Tecnológico como limite da lavra, altura e ângulo dos taludes e equipamentos.

Do ponto de vista da macroeconomia financeira, Newman et al. (2010) *apud* Mandarino (2018), alertam que as empresas mineradoras devem lidar com flutuações de preços do mercado que ocorrem com frequência. Desta forma, se torna necessário, implantar um sistema eficiente de planejamento e controle de produção com o objetivo de assegurar a execução do programa de forma quantitativa, qualitativa e dentro do prazo estipulado e com os recursos corretos.

As empresas dividem o planejamento em longo prazo, curto prazo além do sequenciamento da produção (ADONES, 2019). Não existe uma definição formal para esses termos, entretanto, Costa (2015) define que o longo prazo abrange o planejamento de toda vida útil da mina, ou boa parte deste. Já o de curto prazo compreende planejamento em intervalos mensais, e o sequenciamento de produção são períodos menores que um mês (dias, turnos ou horas).

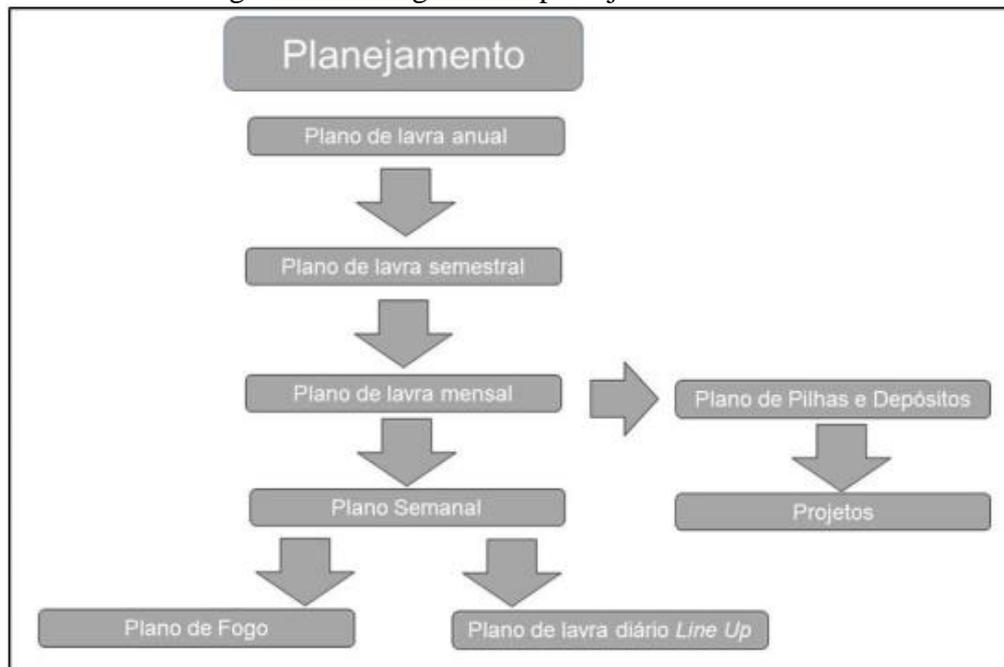
No decorrer da elaboração do plano de lavra de longo prazo, são realizados diversos estudos, entre eles de viabilidade técnica, de investimentos, ampliações e reduções de produção para a mineração (MANDARINO, 2018). Para Curi (2014), é necessário que os resultados do planejamento de longo prazo, como a cava ótima, a relação estéril/minério global, dimensionamento e orçamento de frotas sejam ideais para que o início do processo de extração ocorra de forma a não gerar custos extras para a empresa.

Para Costa (2005) o principal objetivo do planejamento de curto prazo é a determinação do ritmo de lavra a ser implementado em cada frente, fornecendo a usina de beneficiamento uma alimentação adequada, considerando o fato de que cada uma destas frentes possui qualidades e características diferentes. Assim, cada frente deve contribuir com uma quantidade apropriada de minério para que o produto final esteja em conformidade com a exigência do mercado.

Para Costa (2005), o plano de lavra de curto prazo é resultado do plano de longo prazo, diferenciando-se principalmente pelo nível de detalhamento das atividades a serem realizadas, de forma a reduzir as incertezas associadas e incluindo principalmente os aspectos operacionais

da lavra. Este detalhamento deve indicar todas as frentes de lavra a serem executadas no mês, o material que corresponde a cada uma destas frentes, os equipamentos necessários para executar a tarefa e o tempo necessário que esses equipamentos necessitam para cumprir o plano respeitando a variabilidade dos eventos que influenciam na produtividade dentro dos fatores citados anteriormente (COSTA, 2015) (MANDARINO, 2018). O fluxograma a seguir apresenta a sequência das atividades de planejamento da mineração.

Figura 3 - Fluxograma de planejamento de lavra



Fonte: Mandarinino (2018)

Costa (2015) apud Weber (1990) comenta sobre algumas premissas básicas para o planejamento e operação de mina:

- Movimentar a quantidade mínima de material;
- Movimentar o material pela menor distância possível;
- Movimentar o material com a menor quantidade de equipamentos possíveis;
- Movimentar o material na menor quantidade de tempo possível.

O engenheiro de minas responsável pelo planejamento deve realizar seu trabalho de maneira constante e intensa, de forma a agregar todos os fatores citados acima ao plano de lavra, com intuito de reduzir as incertezas, além de lançar um olhar crítico para a operação como um todo, levando em conta as condições tanto econômicas quanto sócio ambientais.

2.3 CUSTOS OPERACIONAIS

A exigência por aumento de competitividade bem como a adoção de novas práticas e novas tecnologias são itens cada vez mais comuns nas empresas de todos os segmentos.

No caso específico da mineração, o aumento da produtividade e a redução dos custos operacionais são igualmente necessários e viabilizados a partir da implantação de novos conhecimentos e novas técnicas (FELSCH, 2014)

Quando os preços das commodities caem, a tendência é que as mineradoras olhem internamente para os seus processos e busquem oportunidades de melhorarem sua eficiência e reduzir seus custos através da implementação de novas técnicas e tecnologias (COUTINHO, 2017).

Para Costa (2018) apud Waleski (1990), custo operacional são todas as despesas diretas e indiretas que variam com a taxa de produção e outros custos como: custo de mão de obra, matéria prima, energia, combustível e despesas gerais.

Os custos de produção devem ser detalhadamente estimados em seus principais componentes: pessoal, material, peças sobressalentes, impostos e taxas, energia elétrica, alugueis, serviços por contrato etc. Esses devem ser elencados por fase de serviços, extração, transporte interno, beneficiamento, estocagem, manuseio e carregamento. Convém ainda separar os custos de operação daqueles de manutenção, sendo que este último constitui uma parcela significativa do custo unitário de produção (RIO DE JANEIRO, 2010)

Os custos operacionais são determinados a partir da produtividade dos equipamentos e o número de ciclos necessários para movimentar um determinado volume de material, com suficiente mão de obra para cobrir estas operações (COSTA, 2018 APUD ZIMMER, 1990).

As operações de lavra são divididas em uma série de atividades que são realizadas em ciclos. Cada uma dessas atividades é composta por diversas ações e tem como objetivo principal desmontar o minério e o estéril e transportá-los para os seus respectivos destinos. As operações de lavra mais comuns são: perfuração, desmonte, carregamento e transporte. A sequência destas atividades visando o aproveitamento econômico de uma jazida recebe o nome de ciclo operacional produtivo. Existem ainda minas que contemplam mais ou menos atividades dentro do ciclo operacional (HARTMAN E MUTMANSKY, 2002)

As minas subterrâneas incluem etapas de fixação de tirantes, ventilação e etc. As minas a céu aberto com materiais menos resistentes excluem as etapas de perfuração e desmonte. Para este caso, existem máquinas de mineração contínua.

As operações de carregamento e transporte podem ainda ser subdivididas em quatro etapas distintas que compõe também o ciclo operacional de produção. São elas: carregamento, transporte cheio, basculamento (descarregamento) e transporte vazio. Essas operações consistem em retirar o material desmontado da frente de lavra até diferentes pontos de descarga.

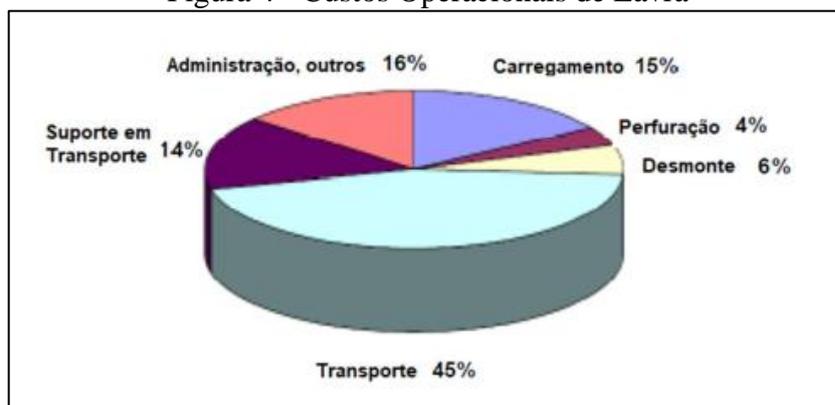
Para Costa (2018) apud Zimmer (1990), os custos operacionais de uma mina são desenvolvidos definindo o número necessário de equipamentos para mover um volume programado dentro de um período de tempo, como consequência das produtividades dos equipamentos. Para esses autores, pode-se definir um cronograma básico para estimar o custeio de produção. Esse cronograma consiste em:

- Determinar os parâmetros de produção;
- Selecionar os equipamentos da mina;
- Estudar a produtividade dos equipamentos;
- Calcular o custo de capital de cada equipamento;
- Estimar o quadro de pessoal;
- Estimar os custos operacionais.

Na maioria das minas a céu aberto, a flexibilidade operacional permite a utilização de equipamentos de maior porte, conseqüentemente maiores capacidades de movimentação de material e isso proporciona uma maior produtividade. O aumento do porte dos equipamentos resulta em menores custos (LAGES, 2018). Entretanto, o tamanho destes equipamentos é limitado pelas restrições geométricas da cava. O tamanho dos equipamentos deve ser proporcional a produção da mina e também ao tamanho da frente de lavra. Desta forma, nem sempre os maiores equipamentos são indicados.

As operações de carregamento e transporte são um dos principais processos de produção da mina, pois impactam diretamente os índices de produtividade das frentes. A operação de carregamento tem por finalidade retirar o material desmontado da frente de trabalho e carregar num sistema de transporte. Já a operação de transporte tem por finalidade mover o material até o seu destino. Devido ao alto custo dessas duas operações, que representa entre 60 e 80% do custo total da lavra, a realização deste estudo se justifica pela necessidade do controle dos índices operacionais destas duas etapas dentro do ciclo operacional. O gráfico a seguir apresenta a composição dos custos operacionais de lavra.

Figura 4 - Custos Operacionais de Lavra



Fonte: Lages (2018)

2.4 MEDIÇÕES DE DESEMPENHO

Ter disponível em tempo hábil, informações críticas e verdadeiras sobre os processos desempenhados é parte fundamental do curso de gestão. Conhecer os resultados atingidos e confrontá-los com as metas previamente definidas, compará-los com os valores das demais empresas do setor, compreender a evolução ao longo do tempo e compreender a sua tendência gera uma informação de valor indiscutível para quem tem de tomar as decisões (CALDEIRA, 2012).

A medida de desempenho tem cada vez mais importância na avaliação de gestão de um negócio. Gerir a performance é medi-la para poder entender o passado, o presente e onde se quer chegar no futuro (COSTA, 2015).

A identificação de lacunas de desempenho é obtida por meio da medição, que se compara o desempenho atual do desejado, fornecendo uma indicação de progresso (WEBER E TOMAS, 2005).

Outro termo importante é a cadeia de valor, que é definida como a rede de atividades independentes de uma organização conectada por ligações operacionais, quando o modo que estas atividades são desempenhadas afeta os custos e a efetividade de outras atividades da cadeia de valor. Para integrar a cadeia de valor mineral e se obterem os benefícios da integração, deve-se ser capaz de medir seu impacto através de indicadores chave de desempenho (KPI – Key Performance Indicator) afim de se quantificarem os ganhos obtidos (NADER, TOMI E PASSOS, 2012)

Para Costa (2018), os indicadores de desempenho são um conjunto de medidas que fornece informações sobre o desempenho de processos e produtos e devem ser escolhidos com cautela para tal finalidade. Para esse autor, algumas das características que o indicador deve possuir são:

- Facilidade de identificação;
- Medição do que é importante;
- Facilidade de compreensão.

O autor finaliza alertando que o mais importante é a análise conjunta dos indicadores. A análise individual trás pouco ou nenhum benefício.

Os indicadores não devem ser escolhidos de forma aleatória. Essa escolha deve ter como objetivo de melhoria no processo, além disso, esses indicadores devem ser do conhecimento de todos os funcionários que trabalham direta ou indiretamente sobre os processos nos quais está sendo medida a performance.

O indicador chave de desempenho (key performance indicator – KPI) é definido como um conjunto de medidas que incidem sobre os aspectos do desempenho organizacional. São sempre taxas, proporções, porcentagens ou medidas, nunca são apenas números (COSTA, 2015 APUD PARMENTER 2010).

A coleta de dados para geração dos KPIs deve ser robusta e fornecer resultados verdadeiros. Problemas nessa etapa podem fornecer mais incertezas ao invés de auxiliar na tomada de decisões. Por isso, a medição de dados deve ser sistemática, num intervalo de tempo determinado previamente e realizada por um profissional treinado com uma metodologia definida. Eles devem permanecer sobre análise até que a meta seja cumprida ou em alguns casos, durante toda vida útil do empreendimento.

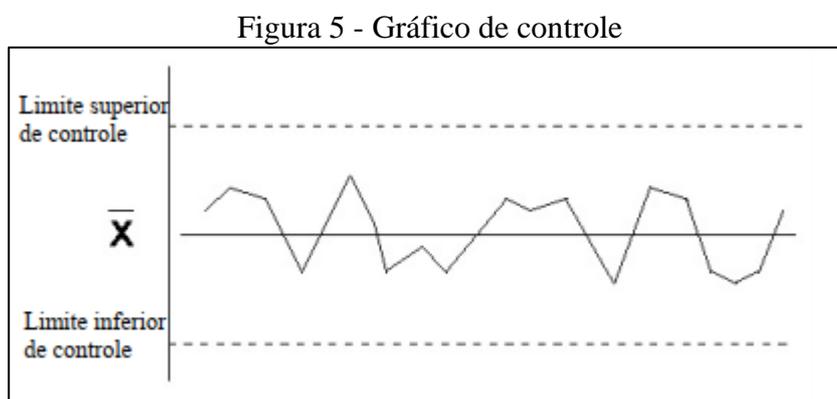
O planejamento de lavra faz o uso extensivo dos KPIs para a elaboração dos planos de curto e longo prazo. Desta maneira, todas as atividades inclusas no ciclo operacional da lavra têm seus índices medidos de maneira sistemática. O controle desses índices auxilia os engenheiros a otimizar a frota de equipamento necessário, tendo como base a produtividade dos mesmos de maneira a atender a produção dentro do tempo estabelecido.

Podemos citar alguns dos principais KPIs utilizados na mineração, divididos em áreas:

- Manutenção: disponibilidade física, utilização, rendimento e tempo médio entre falhas;
- Planejamento de lavra: índices de aderência e cumprimento, relação estéril/minério e DMT (distância média de transporte);
- Operação: movimentação total, produtividade e metros perfurados;

- Beneficiamento: recuperação, massa produzida e teor;
- Financeiro: gasto operacional e gasto unitário;
- Sustentabilidade: geração de resíduos perigosos, ocorrências ambientais críticas, desempenho ambiental.

Para o controle dos KPIs, os gráficos são as ferramentas mais amplamente empregadas, pois mostram a relação entre duas ou mais variáveis. Eles monitoram a variabilidade e estabilidade de um processo. São instituídos limites superiores e inferiores para o controle. O processo estando controlado, os valores oscilarão em torno de uma média dentro de uma faixa delimitada pelos limites superiores e inferiores. (COSTA, 2015). O gráfico a seguir exemplifica como é utilizado essa ferramenta.



Fonte: Costa (2018)

2.5 DESPACHOS ELETRÔNICOS

As mineradoras utilizam sistemas de roteirização para traçar rotas de diversos equipamentos da empresa seguindo alguns critérios de lavra estabelecidos pelo plano de lavra. Para que os caminhões sejam alocados da forma correta, seguindo as diversas restrições estabelecidas para o cumprimento das especificações de lavra, as minas adotam os sistemas de despacho (TEIXEIRA *et. al*, 2019).

Para Wu (2007) apud Costa (2010), roteirização é definido como atendimento de nós de demanda geograficamente dispersos. Na mineração, podemos entender isso como as diferentes frentes de lavra dentro de uma mina e os pontos de descarregamento, como pilhas de estéril, estoques de minério e britadores, sendo que, para cada ligação entre um par de nós, há uma

distância e um custo associado. O objetivo é determinar o conjunto de rotas de menor custo que atenda às necessidades dos nós, respeitando as restrições operacionais.

O principal objetivo do planejamento de produção em uma mina a céu aberto é a determinação de qual ritmo de lavra será implementado em cada frente, fornecendo a usina de beneficiamento uma alimentação adequada. Cada frente de lavra possui características de qualidades distintas e deve contribuir com uma quantidade ótima de material para que o produto final esteja em conformidade com as exigências do cliente ou mercado (COSTA, 2005; NADER; SACHS, 2005).

Uma produção superior à requerida pode causar problemas como a insuficiência ou inadequação dos locais de armazenamento da produção e custos adicionais de manuseio do material, como insumos de manutenção dos equipamentos e o óleo diesel que os abastece. Uma produção inferior a estipulada no plano de operação causa queda no indicador de utilização dos equipamentos da mina e da usina de beneficiamento (NADER; SACHS, 2005)

Para solucionar esses problemas as empresas mineradoras utilizam em suas operações sistemas de despacho eletrônico. A seguir, vamos apresentar a forma como este sistema funciona e seus potenciais ganhos.

Os sistemas de despacho computadorizado foram desenvolvidos na década de 1970 e tem se tornado o modo mais comum de operação em minas a céu aberto (ÇETIN (2004) APUD FELCHS (2014)). O objetivo principal do sistema de despacho computadorizado é minimizar o número de caminhões necessários para transporte, maximizar a produção dos equipamentos de carga através da sua ociosidade e atender aos padrões de qualidade da usina de beneficiamento. Ele completa que a operação de caminhões e equipamentos de carga é um dos itens mais importantes no custo da operação como um todo, assim a utilização do sistema de despacho pode reduzir o custo de capital e de operação em uma mina.

Os sistemas de despacho podem ser divididos ainda em duas categorias: estáticos e dinâmicos. No despacho estático, os caminhões são fixados a um ponto de carga e um ponto de descarga, ou seja, seu deslocamento ocorre entre esses dois pontos em um determinado período de tempo. No entanto, esse tipo de alocação não é suficiente para suprir as necessidades de uma mina (RODRIGUES, 2006). É possível fazer essa conclusão levando em consideração a natureza dinâmica de uma mina, que constantemente tem as condições das suas frentes de trabalho e acessos alterados por fatores naturais e operacionais. Ainda segundo Rodrigues (2006), para contornar as limitações do sistema estático, existe o sistema de alocação dinâmica. O sistema de alocação dinâmica irá incorporar, além das restrições operacionais, variáveis

qualitativas do minério que será transportado afim de atender a necessidade da usina de beneficiamento.

2.6 CARREGAMENTO E TRANSPORTE

Para Racia (2016), as operações de carregamento e transporte consistem em retirar o material extraído da frente de lavra até diferentes pontos de descarga. Em minas a céu aberto a operação tem início com a preparação da área a ser lavrada e posteriormente a perfuração e detonação do material, quando necessário. Então a escavação e o carregamento são feitos por escavadeiras e pás carregadeira distribuídas nas frentes de maneira estratégica para atender a produção. Esses equipamentos retiram o material e o carregam nos equipamentos de transporte (caminhões, esteiras transportadoras, vagões, entre outros). O equipamento de transporte tem a função de transportar esse material até um determinado ponto de descarga que normalmente são pilhas, de estéril, estoques ou britadores. O ciclo da operação então recomeça sendo realizada de forma contínua.

A produtividade da mineração sofreu uma grande transformação ao longo dos anos, impulsionado pelo avanço da tecnologia e, principalmente, da evolução dos equipamentos responsáveis pelas atividades de carregamento e transporte (Lages, 2018)

2.6.1 Equipamentos de carga

Entende-se carregamento como a retirada do material já desmontado da frente de lavra, conduzindo-o para um sistema de transporte. A operação de carga acontece de forma conjugada entre as operações de perfuração e desmonte, desta forma, elas devem estar bem sincronizadas entre si pois são interdependentes. A compatibilidade entre os equipamentos de lavra de toda a frota é um dos fatores chave para que se alcance um menor tempo de ciclo, uma maior produtividade e um menor custo operacional (COUTINHO, 2017).

O carregamento influencia diretamente no ciclo operacional, de modo que uma baixa produtividade desta atividade afeta toda a produção da mina. Os principais fatores que podem influenciar na produtividade desses equipamentos são:

- O tamanho das praças de trabalho: praças que não comportam adequadamente os equipamentos exigem que eles façam mais movimentos ou manobras para concluir o seu objetivo, aumentando o tempo de ciclo;
- O nivelamento do piso no ponto de carga: pisos mal nivelados exigirão mais esforço do equipamento e mais experiência do operador. O equipamento pode deslizar;
- Fragmentação do material: material mal fragmentado irá exigir mais esforço do equipamento para fazer o enchimento da concha, isso aumentará o tempo de ciclo;
- Posicionamento dos caminhões: o posicionamento incorreto do caminhão fará com que a escavadeira demore mais tempo rotacionando a pá para despejar o material na caçamba do caminhão;
- Experiência do condutor: condutores menos experientes tendem a demorar mais tempo para concluir uma tarefa.

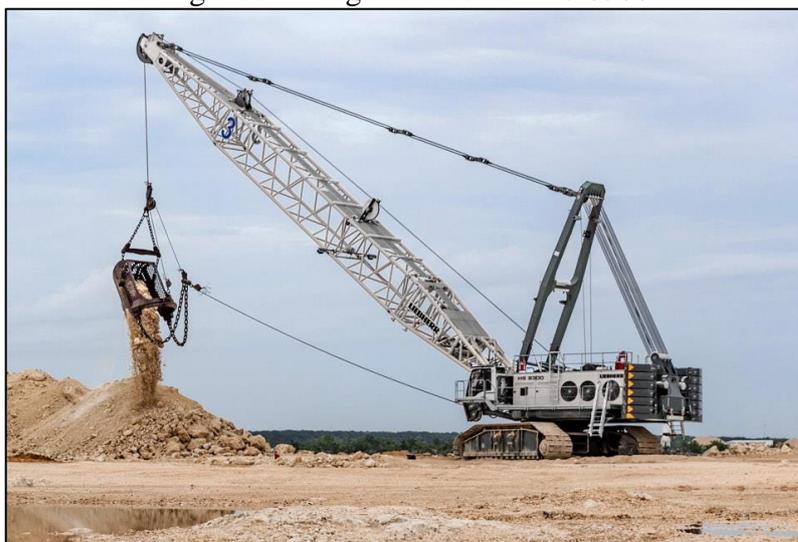
Na mineração a céu aberto, devido a maior flexibilidade da operação, verifica-se uma maior variedade de equipamentos de escavação. Dentre os principais equipamentos que realizam a atividade de escavação de forma cíclica estão: pá carregadeira, escavadeira hidráulica de carregamento frontal, retro escavadeiras hidráulicas, escavadeiras elétricas, dragline, wheel dozer, bulldozer. (LAGES, 2018). As fotos a seguir ilustram alguns equipamentos citados.

Figura 6 - Escavadeira Hidráulica Caterpillar Cat 6030



Fonte: Catálogo de Mineração (2020)

Figura 7 - Dragline Liebherr HS 8300



Fonte: Liebherr (2021)

Cada modelo de carregadeira e caminhão possui uma capacidade específica de carga, podendo-se determinar o número de passes da carregadeira necessários para que seja efetuado o completo enchimento da caçamba. Este número não deve ser menor que três ou maior que seis. Quando isso ocorrer, a adequação do equipamento de carga ou transporte deve ser revista para aperfeiçoar o tempo de ciclo do sistema (COUTINHO, 2017).

Cada equipamento de carga possui uma finalidade, sendo importante um estudo primitivo das condições da operação da mina para a seleção deste equipamento e optar por aquele que melhor se adequa a escala de produção e ao ciclo operacional.

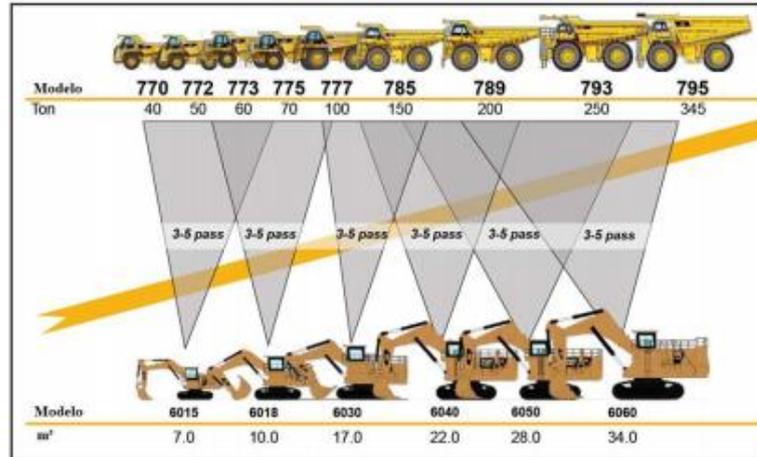
2.6.2 Equipamento de transporte

Na mineração existem vários métodos e sistemas de transporte de material, entretanto os mais comuns são o transporte por caminhões e o transporte por correias (BORGES, 2013).

Segundo Racia (2016) o transporte de materiais por caminhões na mineração é o mais utilizado no mundo. Com o surgimento da mecanização, alavancou-se ainda mais a capacidade da mineração. Os equipamentos estão sendo modernizados e os conceitos de carregamento e transporte se consolidaram. Os caminhões acompanharam o porte das escavadeiras, mas encontrou dificuldades em avançar no tamanho devido aos pneus, que não eram capazes de suportar os pesos e se desgastavam rapidamente. Nas últimas décadas a tecnologia de fabricação

dos pneus avançou e o tamanho dos caminhões aumentou atingindo as capacidades atuais de produção. A figura a seguir apresenta a relação entre o tamanho de caminhões e escavadeiras e o número de passadas necessárias de cada equipamento de carga para o enchimento da caçamba do caminhão.

Figura 8 - Relação de compatibilidade de caminhões fora de estrada e escavadeiras hidráulicas



Fonte: Lages (2018)

O processo de transporte por caminhões tem por objetivo deslocar o material desde a sua origem na frente de lavra até o seu destino final na mina. O minério deve ser transportado para a planta estoques e britadores e o estéril para pilhas/depósitos de estéril (COUTINHO, 2017).

Nas últimas décadas, a redução do custo de transporte foi alcançada principalmente por economia de escala, com o aumento do porte dos caminhões. Porém, devido ao gigantismo da indústria, os equipamentos chegaram próximo ao limite de tamanho. Assim as oportunidades de redução de custos estão ligadas às possibilidades de aumento de produtividade com o gerenciamento ótimo do sistema de despacho na alocação de caminhões (MENA ET AL., 2013 APUD COUTINHO, 2017).

O alto custo da etapa de transporte do material está relacionado com a quantidade de insumos que esses equipamentos utilizam. Dentro desses insumos e materiais podemos citar o óleo diesel, pneus, equipamentos e materiais para a manutenção das máquinas. Todos esses itens citados possuem alto valor agregado. Estas despesas ainda são somadas aos gastos com mão de obra para operação e manutenção. A seguir um gráfico que evidencia a composição dos custos de operação de caminhões em um ambiente de mineração.

Figura 9 - Composição dos custos operacionais de transporte por caminhões



Fonte: Lopes (2010)

Para Lopes (2010), o estudo dos tempos e movimentos do transporte por caminhões são divididos em fixos e variáveis. O tempo fixo é composto por: tempo de carga e descarga e tempo de manobras (para carregamento e basculamento). Já o tempo variável compreende os tempos de transporte carregado e vazio. A distância de transporte está diretamente ligada ao tempo de ciclo por viagem dos caminhões, que por consequência reflete a produtividade da frota. Além da distância, a velocidade está diretamente relacionada com esses tempos, pois causará impacto principalmente nos tempos de transporte carregado e vazio.

O mesmo autor ainda lista as vantagens e desvantagens da lavra por caminhões:

2.6.2.1 Vantagens do uso de caminhões

- Alta flexibilidade operacional especialmente quando a lavra seletiva é exigida. O equipamento pode ser transferido para outras frentes conforme a necessidade do plano de lavra;
- A lavra pode ocorrer simultaneamente em vários níveis, facilitando a blindagem do material e garantindo a qualidade;
- Os caminhões podem ser descolados para operação no estéril quando a estação de tratamento do minério estiver parada;
- Menor variação dos teores médios da jazida devido a possibilidade de verticalização da mina;

- Facilidade de contratação de mão de obra no mercado de trabalho devido a predominância do método de caminhões nas minas a céu aberto;
- Tempo de “posto-em-marcha” reduzido. Os caminhões são pré-montados na fábrica por parte e transportados, bastando montar o conjunto total no local de obra;
- Os mesmos caminhões que são utilizados na fase de decapeamento da mina podem ser usados durante os processos de infraestrutura e produção.;
- As operações não são interrompidas quando uma unidade de transporte é paralisada por problemas de manutenção, é possível continuar a atividade até um limite mínimo econômico de caminhões operando simultaneamente;
- Pode-se manter a frota em operação mesmo quando o silo de descarga estiver paralisado, construindo pilhas reservas estratégicas próximo as estações de descarga, para retomada posterior, quando a frota não puder operar normalmente;
- O casamento das operações conjugadas com escavadeiras e carregadeiras, podem ser alteradas caso as dimensões sejam incompatíveis, aumentando as opções de carregamento;
- Agilidade na evacuação dos equipamentos das áreas de risco eminente.

2.6.2.2 Desvantagens do uso de caminhões

- Possui eficiência energética relativamente baixa, dividida em 50% para o próprio deslocamento de seu peso e 50% para o deslocamento das cargas;
- Elevado tempo de deslocamento vazio, em média 50% do tempo de ciclo de transporte é gasto na atividade de retorno da descarga para a frente de lavra em operação;
- As estradas são relativamente longas devido a limitação de inclinação das rampas, aumentando a distância de transporte gradativa à medida que novos níveis de operação são abertos na mina;
- Custo elevado para abertura e conservação das vias de acesso dos caminhões. As curvas bem planejadas e as larguras das pistas devem ter de 3 a 3,5 vezes a largura do maior veículo que irá trafegar;
- Redução e as vezes paralização das operações devido às chuvas e neblinas que causam instabilidade de tração e baixa visibilidade;

- Necessidade de equipamento de apoio para umectação de vias de acesso com o objetivo de reduzir a poeira (sólidos em suspensão no ar), garantindo a boa visibilidade para o operador e reduzindo o impacto ambiental da atividade e zelando pela saúde das pessoas que trabalham na mina ou estejam próximas a ela;
- O aumento da distância de transporte implica em um aditivo no número de caminhões da frota necessário para garantir a produção desejada, ou ampliação do porte unitário com aquisição de caminhões de maior capacidade de transporte de carga.

A seleção dos equipamentos de transporte leva em consideração principalmente a dimensão dos equipamentos de carga. São levados em consideração os seguintes itens:

- Compatibilidade com o equipamento de carga existente;
- Capacidade de atender a produção planejada;
- Experiência anterior com o equipamento;
- Requisitos de serviço e manutenção;
- Custo de aquisição e custo operacional;
- Utilização e disponibilidade estimadas.

De acordo com Eric (2006) *apud* Racia (2016) as principais considerações para a seleção dos equipamentos são:

- Geologia do depósito;
- Metas de produção;
- Vida útil do projeto;
- Disponibilidade de capital;
- Custo de operação;
- Parâmetros geotécnicos;
- Retorno de investimentos;
- Interferência com o meio ambiente.

A seguir podemos ver a figura de um caminhão basculante com os aparelhos para operação autônoma.

Figura 10 - Caminhão Caterpillar 793F CMD Autônomo



Fonte: Vale (2018)

2.6.3 Produtividade da frota dos equipamentos de carga e transporte

A produtividade das frotas de carregamento e transporte, na mineração a céu aberto, depende de que o projeto e o planejamento de lavra sejam adequados a jazida e que os equipamentos selecionados estejam ajustados às demais operações unitárias de lavra e beneficiamento (SILVA, 2011). Assim o tipo, o número de equipamentos a serem utilizados e a produtividade dependem de:

- Tamanho de valor da jazida: vida da mina, taxa de produção, método de lavra;
- Projeto de cava: altura das bancadas, largura das frentes de trabalho, desnível entre as frentes de lavra e o destino dos caminhões;
- Tipo de rocha: características do minério e do estéril, como densidade in-situ, empolamento, umidade, resistência a escavação, grau de fragmentação;
- Projeto da deposição do estéril: local da deposição, forma de deposição do estéril;
- Projeto das estradas: largura das estradas (recomenda-se uma largura mínima de pista igual a 3,5 vezes a largura do caminhão, o que deixa uma faixa igual a 0,5 vezes a largura entre os veículos que se cruzam e nas laterais. Caso a faixa seja estreita, o motorista se sentirá inseguro e reduzirá a velocidade ao se aproximar de um veículo na direção contrária), inclinação das rampas de acesso, raio das curvas, superfície de rolamento;

- Planejamento de lavra: número de frentes simultâneas, relação estéril/minério, frequência de deslocamento das frentes de lavra;
- Destino do minério: tipo, dimensões, taxa de produção do equipamento que receberá o minério do caminhão, tais como britadores, silos e pilhas de lixiviação;
- Infraestrutura de apoio: recursos de manutenção, recursos para abastecimento; comunicações, etc.;
- Equipamentos de apoio: manutenção de estradas e frentes de lavra, desmonte do minério e do estéril.

2.7 CONCEITOS FUNDAMENTAIS PARA ESTIMATIVA DE PRODUTIVIDADE DOS EQUIPAMENTOS

Como citado anteriormente, este trabalho dará ênfase no planejamento de lavra de curto prazo e no controle de performance dos equipamentos de carga e transporte em um horizonte de tempo mensal.

Será considerado que já houve a seleção das máquinas e o dimensionamento da frota para atender a produção de uma mina. Neste capítulo será listado alguns indicadores chave de desempenho (KPIs) que auxiliam no controle de atuação de caminhões e escavadeiras e são frequentemente utilizados na elaboração dos planos de lavra, na determinação do ritmo de escavação das diversas frentes e na alocação das máquinas. A correta estimativa de indicadores como os que serão apresentados é de fundamental importância para as decisões a serem tomadas. Um cenário de curto prazo demanda uma abordagem diferente dos indicadores em comparação à um longo prazo, visto que são esses indicadores que irão definir a capacidade de produção em um espaço temporal menor, onde valores médios do longo prazo não podem ser utilizados. É necessário inserir no plano de curto prazo informações que representem o cenário presente da operação.

2.7.1 DMT (Distância Média de Transporte) global

A distância média de transporte, ou DMT, é a distância entre os pontos de carga e descarga do material, como por exemplo a distância entre a frente de lavra e o britador e a frente de lavra e a pilha de estéril. O DMT faz parte do estudo do ambiente de trabalho exclusivamente dos equipamentos de transporte e tem por finalidade diminuir a distância entre dois pontos. A DMT pode ser obtida diretamente dos sistemas de despacho. A DMT global pode ser obtida da seguinte maneira:

$$\text{Equação 1: DMT (Distância Média de Transporte)}$$

$$DMT_{Global} = \frac{DMT_{ROM} * M_{ROM} + DMT_{ESTÉRIL} * M_{ESTÉRIL}}{Movimentação Total}$$

Onde:

DMT_{ROM} = Distância média de transporte de ROM (Run of Mine)

M_{ROM} = Massa de ROM

$DMT_{ESTÉRIL}$ = Distância média de transporte de estéril

$M_{ESTÉRIL}$ = Massa de estéril

2.7.2 Tempo de ciclo

O ciclo compreende o conjunto de operações executadas por um equipamento durante um certo período de tempo, voltando, em seguida a sua posição inicial para recomeçá-los. O tempo de ciclo é o intervalo de tempo decorrido entre duas passagens consecutivas do equipamento por qualquer ponto do ciclo. Todos os tempos listados a seguir podem ser facilmente obtidos por relatórios do sistema de despacho. Os tempos de ciclo estão diretamente relacionados com a taxa de produção dos equipamentos. Quanto maior o tempo de ciclo, menor será a taxa de produção. Quanto menor o tempo de ciclo, maior será a produtividade.

2.7.2.1 Tempo de ciclo das escavadeiras

Para uma escavadeira, o tempo de ciclo do carregamento consiste em TC (tempo de carregamento), TRC (tempo de rotação com a caçamba carregada), TD (tempo de descarga) e TRD (tempo de rotação com a caçamba descarregada).

Equação 2: Tempo de Ciclo das Escavadeiras

$$T_{ciclo} = T_C + T_{RC} + T_D + T_{RD}$$

2.7.2.2 Tempo de ciclo dos caminhões

O tempo de ciclo dos caminhões normalmente consiste em tempo TMP (tempo de manobra e posicionamento), TC (tempo de carregamento), TTC (tempo de transporte carregado, TMB (tempo de manobra e basculamento) e TTV (tempo de transporte vazio). A duração do tempo de ciclo é igual a soma dos cinco tempos segundo a equação a seguir:

Equação 3: Tempo de Ciclo dos Caminhões

$$T_{ciclo} = T_{MP} + T_C + T_{TC} + T_{MB} + T_{TV}$$

2.7.3 Fator Disponibilidade dos equipamentos

Pode ser considerado como o tempo que o equipamento está disponível para o uso, podendo ser afetados por fatores como: má organização da mina, más condições de trabalho, muitos turnos de operações, manutenções mal programadas ou mal executadas e etc. Este fator pode ser aplicável tanto a caminhões quanto escavadeiras. As horas em que o equipamento esteve em manutenção é de responsabilidade do setor de manutenção da empresa. Seu valor é dado em porcentagem e pode ser expresso pela seguinte equação:

Equação 4: Disponibilidade Mecânica

$$DF = \frac{HC - (MP + MC)}{HC} * 100\%$$

Onde:

DF = Disponibilidade física;

HC = Horas calendário (corresponde as horas teóricas possíveis de trabalho num intervalo de tempo);

MP = Horas do equipamento em manutenção preventiva, todo serviço programado;

MC = Horas do equipamento em manutenção corretiva, quando o serviço não é programado.

2.7.4 Fator Utilização dos equipamentos

A utilização é aplicada sobre as horas disponíveis do equipamento e é definida como o tempo que o equipamento está trabalhando. O mal dimensionamento da frota, falta de operador, inexperiência do operador, impedimento operacional por tempo climático desfavorável, qualidade do desmonte de rocha e preparação da frente de lavra são agentes que podem afetar este fator. É aplicável tanto a caminhões quanto escavadeiras. As horas trabalhadas pelo equipamento é uma métrica que deve ser medida pelo sistema de despacho. É dado pela seguinte equação:

Equação 5: Fator Utilização dos Equipamentos

$$UT = \frac{HT}{HC - HM} * 100\%$$

Onde:

UT = Fator utilização

HC = Horas calendário (corresponde as horas teóricas possíveis de trabalho num intervalo de tempo);

HM = Horas que o equipamento ou frota permaneceu em manutenção (corretiva ou preventiva) num determinado espaço de tempo;

HT = Horas efetivamente trabalhadas pelo equipamento ou frota num determinado intervalo de tempo;

2.7.5 Fator Rendimento

O fator rendimento é a relação entre as horas efetivamente trabalhadas e as horas programadas, ou seja, é o produto da disponibilidade física pela utilização. É aplicável tanto a caminhões quanto escavadeiras. Pode ser expresso pelas seguintes equações:

Equação 6: Fator Rendimento (em função das horas trabalhadas efetivas e previstas)

$$R = \frac{HT}{HC} * 100\%$$

Onde:

R = Fator rendimento;

HT = Horas efetivamente trabalhadas pelo equipamento ou frota num determinado intervalo de tempo;

HC = Horas calendário (corresponde as horas teóricas possíveis de trabalho num intervalo de tempo).

Equação 7: Fator Rendimento (em função da disponibilidade física e utilização do equipamento)

$$R = DF * UT$$

Onde:

R = Fator rendimento;

UT = Fator utilização;

DF = Disponibilidade física

2.7.6 Taxa de produção

A taxa de produção de um equipamento é dada pela massa ou volume do material movimentado por unidade de tempo. É aplicável a equipamentos de carga e transporte. Está estritamente ligada ao tempo de ciclo, uma vez que as horas trabalhadas são a somatória do tempo de ciclo do equipamento em um determinado horizonte temporal. Quanto maior o tempo de ciclo, maior será a quantidade de horas trabalhadas, conseqüentemente, menor será a taxa de produção. Pode ser expressa pela seguinte equação:

Equação 8: Taxa de Produção

$$T_p = \frac{\textit{Produção}}{HT}$$

Onde:

Tp = Taxa de produção

HT = Horas efetivamente trabalhadas pelo equipamento ou frota num determinado intervalo de tempo;

3 METODOLOGIA

Com base no capítulo 2, o desenvolvimento deste trabalho se deu a partir do levantamento e obtenção dos principais indicadores de performance dos equipamentos de transporte e carga de uma mina a céu aberto e como estes auxiliam para a confecção de um plano de lavra mensal.

Monitorar o desempenho de uma empresa é essencial. A utilização de indicadores de desempenho tem por finalidade medir os resultados de uma empresa de maneira que seja possível a sua comparação com a metas estabelecidas e os possíveis desvios da performance, lucratividade e produtividade. Estes indicadores são variáveis métricas que precisam possibilitar a comparação de melhorias no processo por meio de medidas de desempenho ao longo do tempo de qualquer processo através de metodologias analíticas onde se destacam as ferramentas estatísticas.

Na mineração, por ser uma atividade industrial, a redução de custos e o aumento de desempenho representa uma parcela significativa dos investimentos recebidos. Visando melhorar os indicadores, foram desenvolvidos novas tecnologias e equipamentos e dentro desse contexto destaca-se o uso de sistemas computadorizados que auxiliam a tomada de decisões na rotina de trabalho e também no dimensionamento e alocação de insumos e equipamentos nas frentes de trabalho.

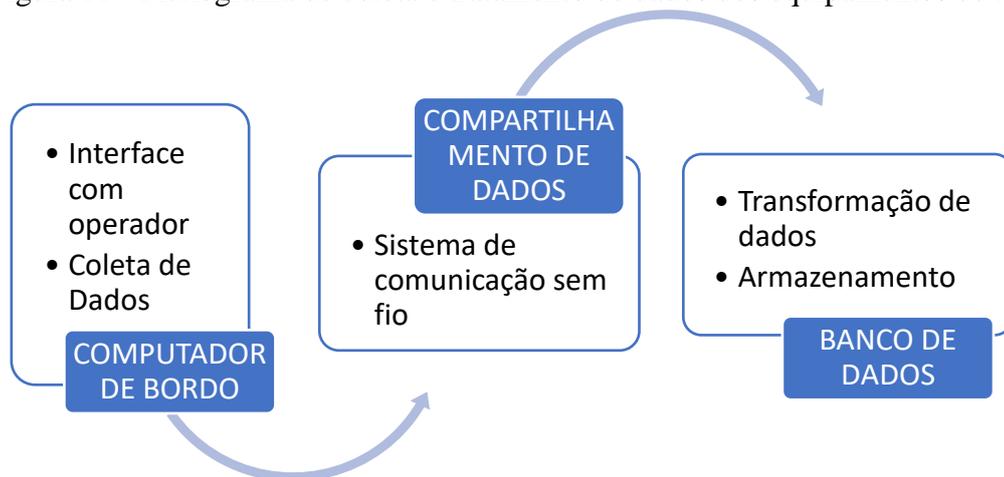
3.1 ESTUDO DE CASO

A empresa que será utilizada para o estudo em questão é uma mina de ouro de médio porte, com capacidade para lavra de até 7 milhões de toneladas de material por ano. A lavra acontece pelo método de bancadas e utiliza caminhões com caçamba de 18m³ e capacidade de até 40t. As escavadeiras possuem conchas de 6m³. O REM (relação estéril/minério) é de aproximadamente 4. O desmonte do material é feito através de explosivos. A mina fica localizada na cidade de Santa Bárbara, Minas Gerais.

3.1.1 Coleta e tratamento de dados

A coleta e o tratamento de dados têm como objetivo obter os índices operacionais dos equipamentos de mina. Esse processo segue as etapas descritas na figura 11. O primeiro passo ocorre com a inserção da atividade a ser realizada pelo condutor no computador de bordo que acompanha o equipamento. Esse aparelho é responsável pela coleta dos dados. A etapa seguinte dá-se pelo envio desses dados ao CCO (Centro de Controle Operacional) que tem como meta a transformação desses elementos em índices operacionais, que auxiliam na gestão da performance da mina e no planejamento das atividades. Esses dados são armazenados com a finalidade de se obter uma base comparativa histórica.

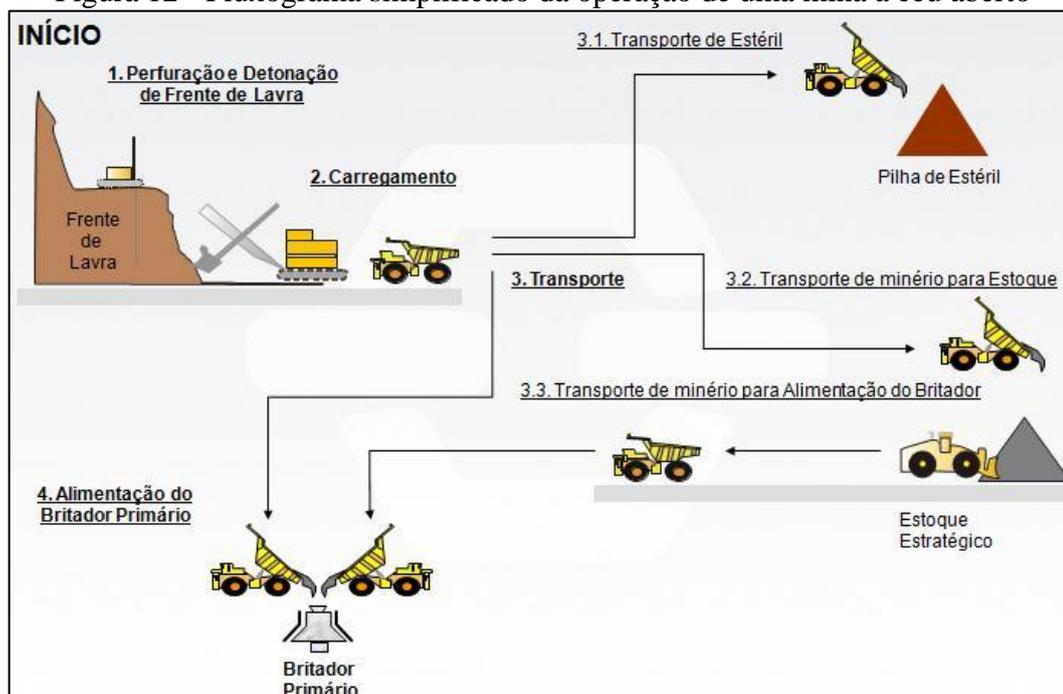
Figura 11 - Fluxograma de coleta e tratamento de dados dos equipamentos de mina



Fonte: Próprio autor (2021)

Em uma mina a céu aberto as atividades se iniciam com a preparação da frente para que esta possa ser perfurada e detonada causando a fragmentação do material. O equipamento de carga então é deslocado para a frente onde houve o desmonte da rocha e dá-se início ao processo de carregamento dos caminhões que transportam o material da frente até pontos de descarga (pilhas de estéril, estoques de minério e britadores). Ao finalizar os trabalhos nessa frente, os equipamentos são alocados para uma outra frente disponível onde repetirão as mesmas operações. O processo é ilustrado na figura a seguir:

Figura 12 - Fluxograma simplificado da operação de uma mina a céu aberto



Fonte: Felchs (2014)

O ciclo do caminhão é composto pelas seguintes etapas: deslocamento vazio, carregamento, deslocamento cheio e basculamento. Entre estas etapas podemos considerar outros eventos que são chamados de tempos fixos. Os tempos fixos são: tempo de fila no carregamento e basculamento e tempo de manobra no carregamento e basculamento. Em resumo, para a realização completa do ciclo, são necessários quatro apontamentos do operador do equipamento de transporte (destino, chegada, início da carga e chegada ao local de descarga), além de um apontamento do operador do equipamento de carga (fim do carregamento). Estas operações alimentam um banco de dados, que através de consultas e fórmulas específicas se transformam em indicadores de desempenho.

As minas que optam pela utilização do sistema de despacho eletrônico devem possuir uma infraestrutura de envio e recepção de dados dos equipamentos em tempo real que será descrito a seguir. Essas informações são transmitidas via rede wireless, ou seja, sem a necessidade de cabos.

3.1.1.1 Computador de bordo

Cada caminhão e escavadeira dispões de um computador de bordo que será utilizado pelo operador. Esse computador fica localizado na cabine do equipamento, de maneira que possa ser facilmente acessado pelo condutor. Nele será informado a identificação de quem está conduzindo o equipamento, normalmente essa identificação é feita pelo número de matrícula. Em seguida, é inserido informações sobre as condições do veículo após uma inspeção visual feita pelo próprio operador. Na mineração, esse ato é conhecido como check-list do equipamento e é parte fundamental para a segurança dos trabalhadores e integridade do equipamento. É dado início então ao ciclo operacional. O condutor solicita ao computador de bordo o destino, neste momento o computador retorna frente na qual o motorista deve se deslocar de forma a atender os parâmetros de disponibilidade dos equipamentos de carga e os parâmetros quantitativos e qualitativos do material. O computador de bordo então irá contabilizar o tempo que foi gasto para cada uma das operações, a massa movimentada, os equipamentos e operadores envolvidos e a distância percorrida. Outras métricas podem ser medidas de acordo com a necessidade da mina. A figura 13 exhibe o ciclo de operações de um computador de bordo utilizado na mineração.



Fonte: Felchs (2014)

Ainda podem ser informadas ao computador de bordo as demais condições operacionais em que o caminhão ou a escavadeira se encontram. Esses estados indicam a condição operacional que o equipamento se encontra e podem ser:

- Operando: quando o equipamento se encontra operando efetivamente;
- Manutenção: quando o equipamento se encontra em manutenção preventiva ou corretiva;
- Impedimento operacional: quando o equipamento se encontra impedido de operar por motivos não gerenciáveis, ou seja, alguma condição que não pode ser alterada naquele momento;
- Atraso operacional: equipamento parado por motivos gerenciáveis e que retornará à operação em breve.

O computador ainda tem a função de informar ao condutor as condições em que o veículo está operando: a velocidade, rotação do motor, pressão dos pneus e etc. A seguir vemos um exemplo de um computador de bordo usado na mineração.

Figura 14 - Computador de bordo para controle de frota



Fonte: SEVA, 2021

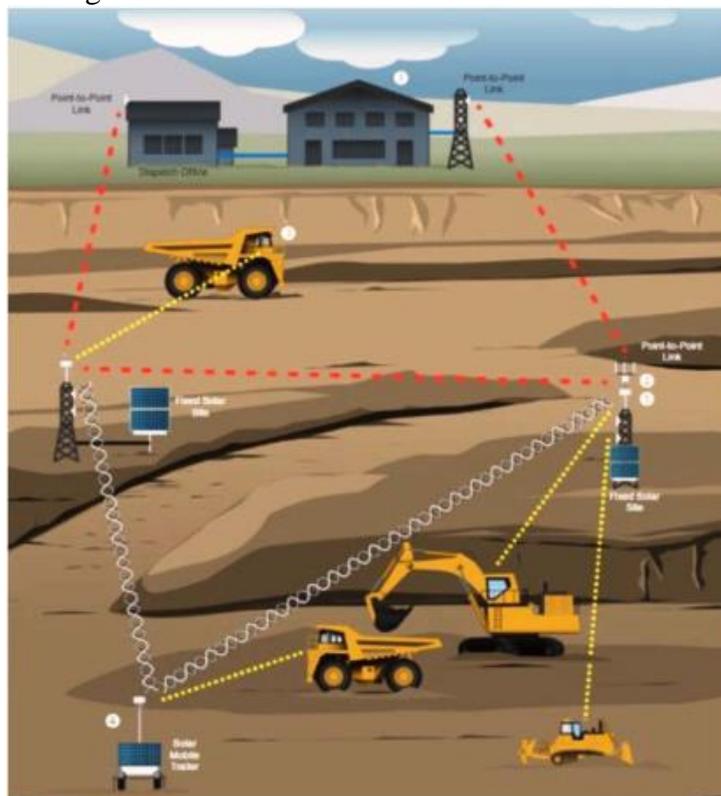
Além das condições operacionais dos equipamentos, é necessário que haja a informações da posição geográfica dos mesmos. Essa informação é coletada por um dispositivo de GPS (Global Positioning System) que pode estar localizado interna ou externamente ao computador de bordo.

3.1.1.2 Compartilhamento de dados

Após a coleta, é necessário que haja o compartilhamento desses dados. Dentro da mina a rede de telecomunicação não necessita de cabos. Esses não poderiam ser empregados devido principalmente a mobilidade dos equipamentos que estão em constante movimentação. A comunicação é feita via ondas de rádio. A rede é composta por hardwares de processamento e conversão de dados, antenas repetidoras móveis, access points e links secundários. Estes hardwares são responsáveis pela distribuição do sinal de rádio na mina. Pode-se citar dois equipamentos que fazem essa comunicação:

- Hub equipamentos: É utilizado em todos os equipamentos da mina. Ele é carregado com um software específico para cada equipamento de carga e transporte e tem o objetivo de processar a comunicação entre o equipamento de campo e o computador central;
- Hub rádio: processa as informações vindas dos dados de sinal de rádio dos equipamentos. Compreende e converte em sinais digitais que partem dos sinais de dados de rádio. O hub rádio atua como um roteador.

Figura 15 - Sistema de transmissão de dados



Fonte - Vale (2019)

3.1.1.3 Banco de dados

A última etapa deste processo é o armazenamento e tratamento dos dados coletados e enviados pelo computador instalado nos caminhões. Esses dados após o devido tratamento, fornecerão os índices de produtividade necessários para a confecção do plano de lavra.

Um banco de dados é uma coleção de dados relacionados. Os dados são fatos que podem ser gravados e que possuem um significado implícito. Um banco de dados é projetado, construído e povoado por dados atendendo a uma proposta específica, além de possuir um grupo de usuários definidos e algumas aplicações concebidas de acordo com o interesse desse grupo de usuários. Na mineração podemos entender os dados como as operações realizadas pelos equipamentos. Essas operações contêm uma descrição da ação que foi desenvolvida, por exemplo: basculamento, carregamento, movimentando vazio, o tempo gasto para a execução desta ação, as entidades envolvidas e outras métricas controladas durante o processo. O banco de dados é a coleção de todas essas operações num determinado período de tempo. Um banco de dados possibilita um melhor gerenciamento das minas, com o histórico dos eventos ocorridos é possível entendê-los de uma forma mais eficaz e assim resolver os problemas decorrentes dos mesmos.

Um sistema gerenciador de banco de dados (SGBD) é uma coleção de programas que permite aos usuários criar e manter um banco de dados. O SGBD é, portanto, um sistema de softwares de propósito geral que facilita os processos de definição, construção, manipulação e compartilhamento de banco de dados entre vários usuários e aplicações (PINHEIRO ET AL., 2005). Na mineração, é comum a utilização de softwares como o MS Excel, o Power BI e o Minitab, cada um com suas respectivas funções. O MS Excel normalmente exerce a tarefa de tratar os dados emitidos pelo sistema de despacho, convertendo as informações para formatos aplicáveis em outros softwares e gerando relatórios que podem ser facilmente acessados por computadores dentro do sistema. O Power BI tem a função de transformar esses relatórios em plataformas de consulta e exibição das informações coletadas. Por último o Minitab executa a função de ferramenta estatística, extremamente poderoso para identificação de padrões comportamentais dos equipamentos e operadores.

3.1.2 Análise estatística dos dados

Após a identificação dos indicadores a serem analisados e apresentação da metodologia de coleta e tratamento dos dados geradores desses indicadores, a etapa subsequente foi a análise amostral das variáveis avaliadas e a identificação de suas características.

Foi empregada uma amostragem probabilística, isso significa que os valores dos indicadores têm probabilidades iguais para assumir qualquer valor, sendo que a técnica empregada para a coleta de dados foi de segundo grau, ou seja, não houve interferência com o equipamento responsável pelas medições.

Para a realização desse trabalho, foram utilizados dados dos meses de janeiro a junho do ano de 2021, coletados pelo sistema de despacho da mina.

Foram verificadas as seguintes variáveis:

- Equipamentos de carga: produtividade efetiva e utilização
- Equipamentos de transporte: produtividade efetiva e DMT (Distância Média de Transporte)

É possível constatar que todas as variáveis citadas são aleatórias contínuas. Isso significa que elas assumem valores em uma escala contínua para qual os valores não inteiros fazem sentido. Para verificar a normalidade dessas variáveis, utilizou-se o teste de Kolmogorov-Smirnov. O software utilizado para tais análises foi o Minitab versão 20.

Para determinar seguem ou não uma distribuição normal, é necessário comparar o valor p com o nível de significância. O valor p é um índice no qual o *software* usa para rejeitar ou não a hipótese de aderência, no caso, a hipótese de normalidade. Quando o valor p for menor ou igual ao nível de significância, a hipótese é rejeitada. Caso o valor p seja maior que o nível de significância, mais fraca serão as evidências para rejeitar a hipótese. Abaixo segue uma tabela para comparação do valor p .

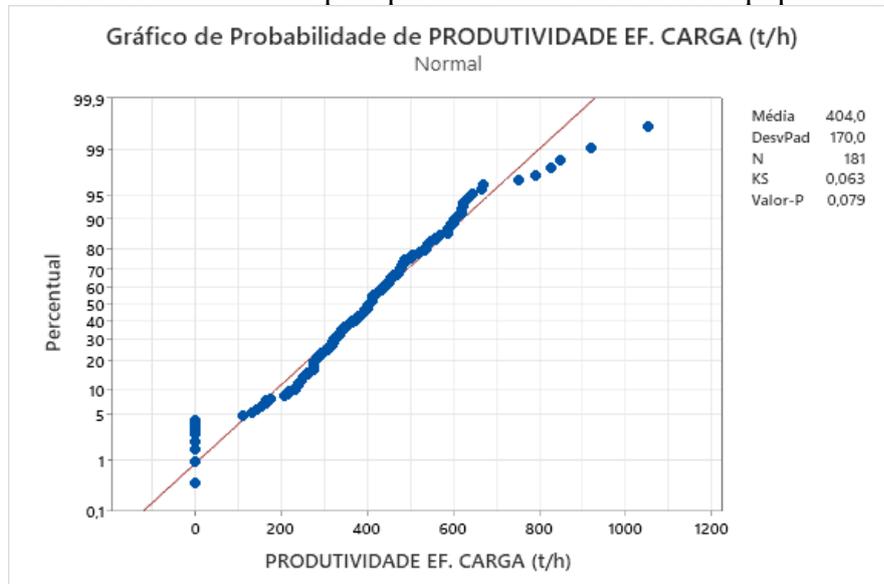
Tabela 1 - Valores usuais para valor p

Valor	Critério
valor p < 0,01	Evidência forte contra a hipótese de aderência
0,01 ≤ valor p < 0,05	Evidência moderada contra a hipótese de aderência
0,05 ≤ valor p < 0,1	Evidência potencial contra a hipótese de aderência
valor p > 0,1	Evidência fraca ou inexistente contra a hipótese de aderência

Fonte - Felsch (2014)

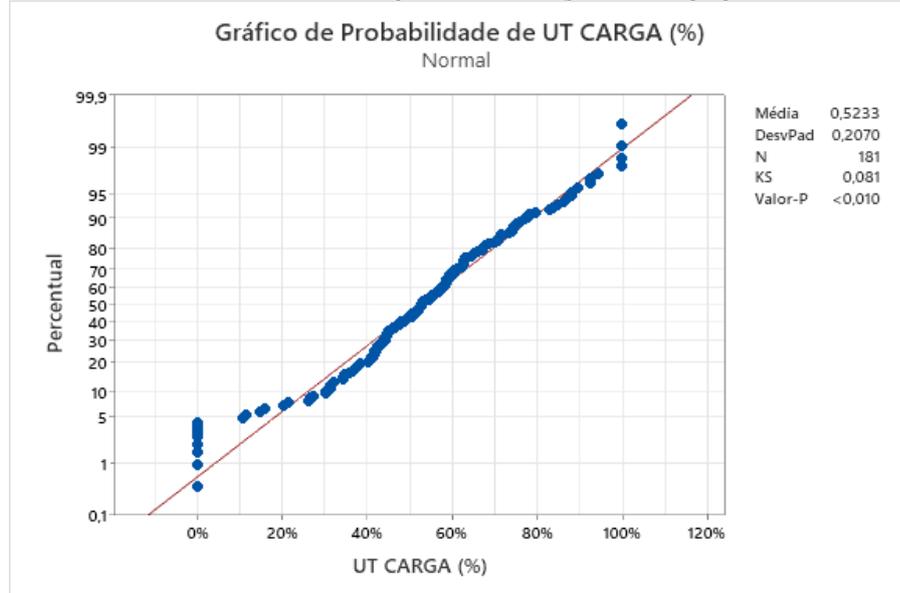
Seguem os resultados a seguir:

Figura 16 - Teste de normalidade para produtividade efetiva dos equipamentos de carga



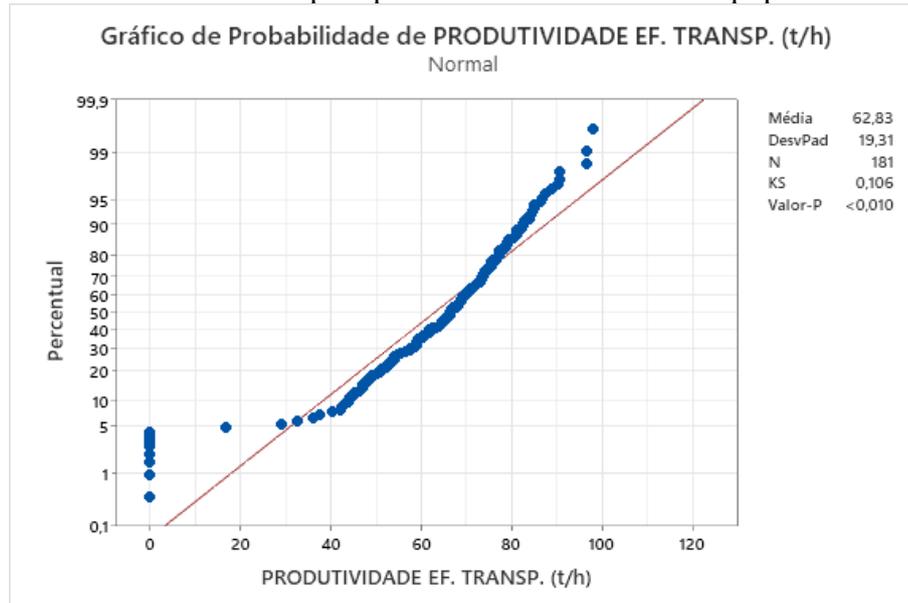
Fonte - Próprio autor

Figura 17 - Teste de normalidade para a utilização dos equipamentos de carga



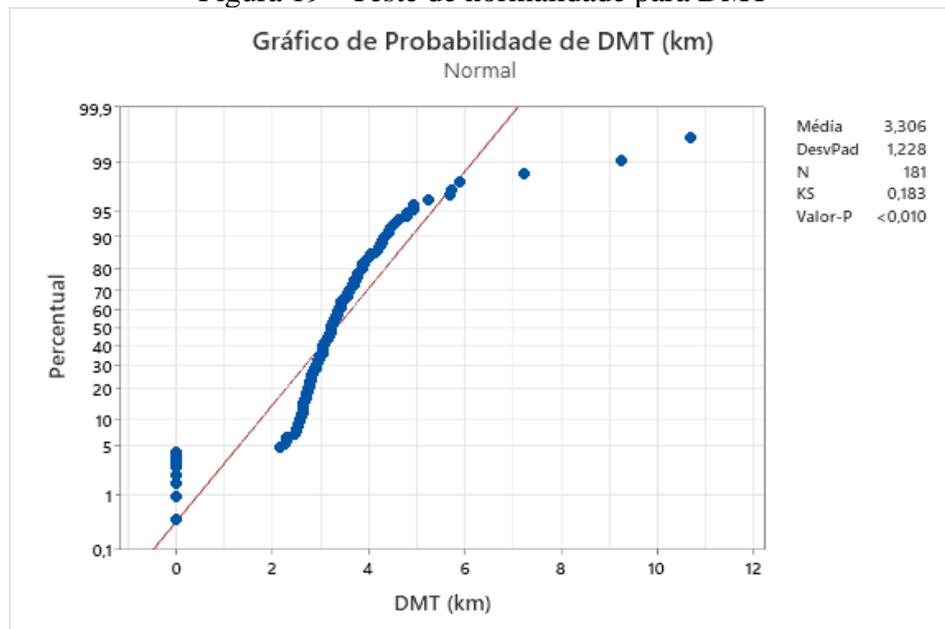
Fonte - Próprio autor

Figura 18 - Teste de normalidade para produtividade efetiva dos equipamentos de transporte



Fonte - Próprio autor

Figura 19 - Teste de normalidade para DMT



Fonte - Próprio autor

É possível constatar que apenas a Produtividade efetiva dos equipamentos de carga possui uma evidência potencial contra a hipótese de aderência, todos os demais índices possuem uma forte evidência contra a hipótese.

Para verificar a força da relação das variáveis mencionadas com os valores planejados para os respectivos meses, foi realizado um teste de correlação. Esse teste busca verificar a aderência dos valores estimados no planejamento com os obtidos em campo. O método mais usado para a investigação de pares de dados é a utilização de diagramas de dispersão. Para analisar as correlações o nível de correlação é proposto a seguinte tabela:

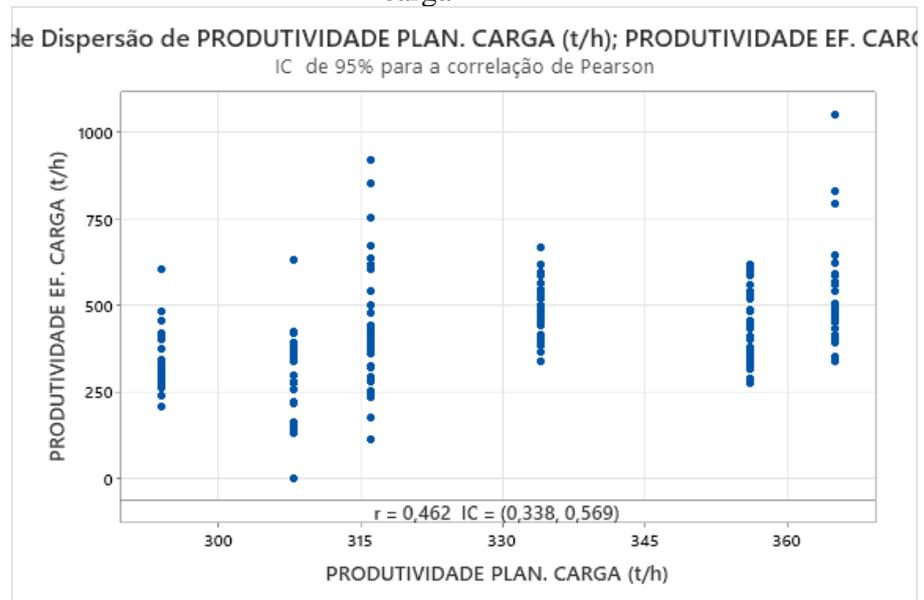
Tabela 2 - Níveis de significância para correlação

Intervalo	Significância
0 – 0,2	Correlações nulas
0,21 – 0,40	Correlações fracas
0,41 – 0,70	Correlações substanciais
0,71 – 0,90	Correlações fortes
0,91 – 1	Correlações extremamente fortes

Fonte - Próprio autor

Os resultados são mostrados a seguir:

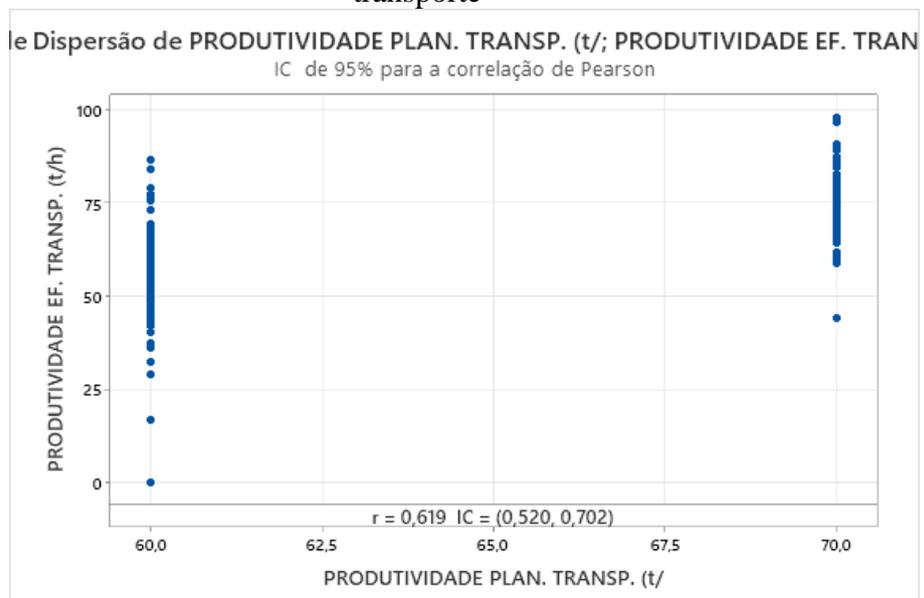
Figura 20 - Teste de correlação entre produtividade efetiva e planejada para equipamentos de carga



Fonte - Próprio autor

O resultado do nível de correlação foi igual a 0,462, o que indica uma correlação substancial.

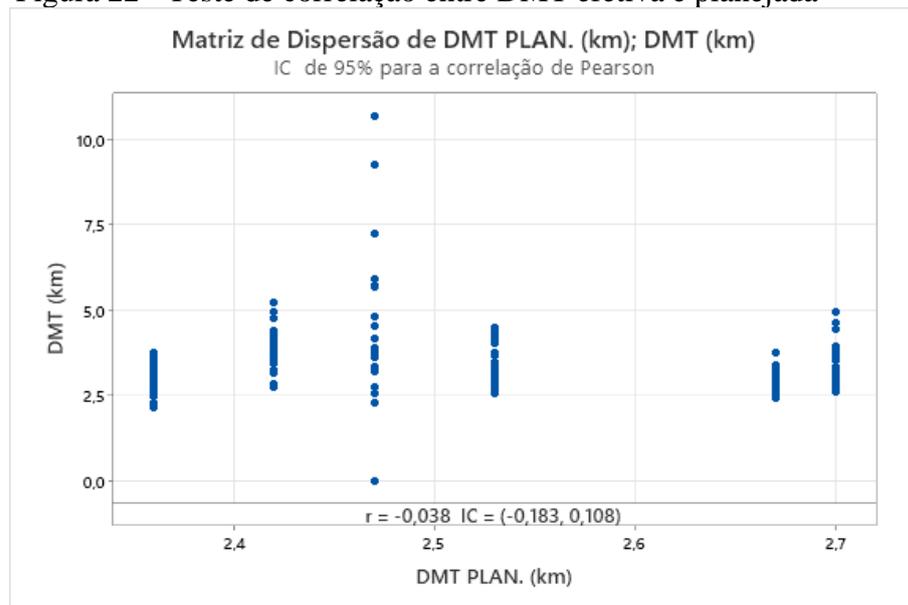
Figura 21 - Teste de correlação entre produtividade efetiva e planejada para equipamentos de transporte



Fonte - Próprio autor

O resultado do nível de correlação foi igual a 0,619, o que indica uma correlação substancial.

Figura 22 - Teste de correlação entre DMT efetiva e planejada



Fonte - Próprio autor

O resultado do nível de correlação foi igual a 0,038 o que indica uma correlação nula. Não foi possível medir o nível de correlação do fator utilização dos equipamentos de carga pelo fato que a empresa emprega um único valor como meta para este indicador, não sendo possível medir a força de relação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo será demonstrada a necessidade do controle dos índices operacionais para o dimensionamento da frota de caminhões e escavadeiras durante o planejamento de lavra de curto prazo e o impacto significativo que a ingerência desses índices pode provocar.

Como citado anteriormente, o principal objetivo do planejamento de lavra de curto prazo é a determinação do ritmo de lavra a ser implementado em cada frente, fornecendo a usina de beneficiamento uma alimentação adequada, considerando o fato de que cada frente possui qualidades e características diferentes. Além disso, o plano deve indicar a quantidade de equipamentos necessários para executar a tarefa, bem como o tempo exigido para o seu cumprimento. Algumas premissas básicas devem ser consideradas para a realização do plano de lavra:

- Movimentar a quantidade mínima de material;
- Movimentar o material na menor distância possível;
- Movimentar o material com a menor quantidade de equipamentos possíveis;
- Movimentar o material na menor quantidade de tempo possível.

As operações de carregamento e transporte são responsáveis pelo manuseio deste material, movendo-o da frente de lavra para o seu destino, seja o britador ou pilhas. O custo dessas etapas representa entre 60 e 80% do custo total da lavra, justificando a necessidade do controle dos índices operacionais desses equipamentos.

Um dos principais problemas em diferentes minas a céu aberto é a seleção do número e o porte ideal de equipamentos de carregamento e transporte que satisfaçam os critérios operacionais e econômicos dentro de uma mineração. Este problema pode ser enfrentado tanto na fase de projeto como durante o desenvolvimento da mineração, o que na prática não é dada a devida atenção à construção de cenários para o dimensionamento e seleção de equipamentos por parte dos gestores.

O dimensionamento da frota de caminhões e escavadeiras pelo planejamento de lavra pode ser entendido como um ciclo composto pelas seguintes etapas: obtenção dos dados dos equipamentos via sistema de despacho eletrônico, tratamento dos dados e obtenção dos índices operacionais, delineação e execução do plano de lavra.

Figura 23 - Ciclo de obtenção de dados e criação do plano de lavra



Fonte: Próprio autor

O cálculo de estimativa de produção está intimamente ligado as ferramentas e métodos aplicados para obtenção e tratamento dos dados provenientes da operação. Os resultados fidedignos geram planos mais aderentes a realidade da mina. Quanto maior a representatividade e veracidade dos indicadores de produção estimados aos indicadores praticados, maior será a aderência da estimativa de produção a produção realizada.

As estimativas dos indicadores de produção devem sempre ser fundamentadas em estudos de campo, manuais de fabricantes e principalmente estar aderente às médias históricas praticadas em cada operação afim de se evitar que esses sejam subestimados ou superestimados, causando divergências na capacidade produtiva dimensionada com a realizada.

Pequenas variações nos indicadores podem reduzir ou aumentar o número de equipamentos na frota. Uma pequena melhoria em qualquer um dos indicadores seja na disponibilidade, utilização, eficiência ou produtividade poderia otimizar o número de equipamentos.

Apesar do dimensionamento de frotas por indicadores de produção gerar resultados extremamente fidedignos à realidade da operação, este deve ser utilizado em conjunto com outras ferramentas, métodos, premissas e oportunidades adequadas a cada caso e frota dimensionada.

A criação de um banco de dados permite a consulta e comparação dos valores praticados pelos equipamentos no mês corrente com médias históricas. Esse tipo de comparação facilita identificar padrões anormais que podem estar gerando custos extras a empresa ou verificar oportunidades no aumento da produção.

Objetivando a exemplificação da importância do monitoramento dos equipamentos e coleta de dados, será demonstrado a seguir três cenários para o dimensionamento da frota da mina tratada nesse trabalho, a partir dos índices operacionais obtidos pela operação. O primeiro cenário terá o papel de controle, ou seja, representa os KPI's mais aderentes a realidade da operação. Os cenários seguintes simularão uma variação desses índices de forma a provocar uma diminuição ou aumento da quantidade de equipamentos da frota. Essa variação tem o intuito de reproduzir uma falha na obtenção dos dados operacionais dos equipamentos, consequentemente gerando índices de produção não fidedignos. Essa inconsistência pode significar a super ou subestimação dos gastos planejados e uma super ou subestimação da produção.

Os principais motivos para a medição incorreta dos KPI's dos equipamentos de carga e transporte são:

- A inexperiência dos condutores ao utilizar o computador de bordo e não apontar corretamente as etapas em execução. Esse problema pode ser solucionado através do treinamento dos operadores ou ainda a implantação recursos capazes de identificar as etapas do processo sem a necessidade de interferência humana;
- A falha de *hardwares* que aparelham os caminhões e escavadeiras, pois devido a alto nível de vibrações e poeira que estão expostos no ambiente da mina, podem vir a apresentar alguma anomalia no funcionamento. A manutenção periódica nesses componentes é fundamental para o processo de medição dos índices operacionais;
- A descentralização dos dados pode implicar em diferentes padrões de medição entre as áreas da mina. Quando duas ou mais áreas utilizam métricas diferentes, os resultados operacionais também tendem a ser diferentes o que pode ocasionar em perdas no processo. A padronização dos índices bem como a normatização das medições gera indicadores de performance mais confiáveis e melhorias para o processo.

Para estimar o número de equipamentos, foi utilizado a seguinte equação:

Equação 9: Número de equipamentos na frota

$$N_{Equip} = \left(\frac{Massa\ Total}{Horas\ Trabalhadas} \right) * \frac{1}{Prod_{Ef}}$$

Onde:

Nequip = Número de equipamentos na frota

Prodef = Produtividade efetiva da frota

Em que,

$$\text{Equação 10: Horas trabalhadas efetivas} \\ \text{Horas Trabalhadas} = DF * UT * HT$$

Onde

DF = Disponibilidade física

UT = Utilização

HT = Horas totais programadas (no caso deste estudo, são as horas totais em um mês com 30 dias, cada dia composto por 3 turno de 8 horas cada)

Por se tratar de equipamentos, o resultado da operação deve ser arredondado para um número inteiro seguindo a seguinte premissa: caso o número decimal for menor ou igual a 5% do número inteiro – por exemplo, 1,05; 2,10; 3,15; 4,20, e assim por diante – mantém-se o número inteiro, arredondando para baixo. Se o número decimal for maior que 5% do número inteiro, considera-se o primeiro número inteiro acima.

A capacidade ociosa da frota de equipamentos é dada pela diferença entre a capacidade produtiva do cenário de controle e a capacidade produtiva dos cenários em questão.

4.1 CENÁRIO 1 (CONTROLE)

O cenário um representa o dimensionamento da frota para um mês que é prevista uma produção de 300.000 toneladas. A mina irá operar durante 30 dias corridos, divididos em 3 turnos de 8 horas cada.

Tabela 3 - Cenário 1 para cálculo de frota de equipamentos

Cenário 1 (Controle)		
Produção/mês	300.000	t
Horas/Turno	8	h
Turnos	3	-
Dias	30	-
Horas/Mês	720	h
Dimensionamento do número de escavadeiras		
DF	75,0%	
UT	60,0%	
Rend	45,0%	
Produtividade Efetiva	280	t/h
Horas Disponíveis	324	
Número de Equipamentos	3,31	
Número de Equipamentos	4	
Capacidade de Produção	362.880	t
Capacidade Ociosa	62.880	t
Dimensionamento do número de Caminhões		
DF	70,0%	
UT	88,0%	
Rend	61,6%	
Produtividade Efetiva	70	t/h
Horas Disponíveis	443,52	
Número de Equipamentos	9,66	
Número de Equipamentos	10	
Capacidade de Produção	310.464	t
Capacidade Ociosa	10.464	t

A partir dos índices operacionais fictícios e utilizando as equações citadas, foi determinado que são necessárias 4 escavadeiras e 10 caminhões para suprir a demanda de produção.

4.2 CENÁRIO 2

O cenário dois, semelhante ao primeiro, representa o dimensionamento da frota para um mês que é prevista uma produção de 300.000 toneladas. A mina irá operar durante 30 dias corridos, divididos em 3 turnos de 8 horas cada.

Tabela 4 - Cenário 2 para cálculo de frota de equipamentos

Cenário 2		
Produção/mês	300.000	t
Horas/Turno	8	h
Turnos	3	-
Dias	30	-
Horas/Mês	720	h
Dimensionamento do número de escavadeiras		
DF	85,0%	
UT	70,0%	
Rend	59,5%	
Produtividade Efetiva	280	t/h
Horas Disponíveis	428,4	
Número de Equipamentos	2,50	
Número de Equipamentos	3	
Capacidade de Produção	272.160	t
Capacidade Ociosa	- 27.840	t
Dimensionamento do número de Caminhões		
DF	80,0%	
UT	95,0%	
Rend	76,0%	
Produtividade Efetiva	70	t/h
Horas Disponíveis	547,2	
Número de Equipamentos	7,83	
Número de Equipamentos	8	
Capacidade de Produção	248.371	t
Capacidade Ociosa	- 51.629	t

Simulou-se o acréscimo nos valores de disponibilidade física e utilização. Desta maneira, a frota necessária foi de 3 escavadeiras e 8 caminhões. Uma quantidade aquém da demandada no cenário de controle. Isso pode significar que a meta de produção não seja cumprida. O não cumprimento da meta pode refletir em atrasos na entrega do produto gerando multas e insatisfação do cliente.

4.3 CENÁRIO 3

O cenário três, semelhante aos anteriores, representa o dimensionamento da frota para um mês que é prevista uma produção de 300.000 toneladas. A mina irá operar durante 30 dias corridos, divididos em 3 turnos de 8 horas cada.

Tabela 5 - Cenário 2 para cálculo de frota de equipamentos

Cenário 3		
Produção/mês	300.000	t
Horas/Turno	8	h
Turnos	3	-
Dias	30	-
Horas/Mês	720	h
Dimensionamento do número de escavadeiras		
DF	75,0%	
UT	60,0%	
Rend	45,0%	
Produtividade Efetiva	250	t/h
Horas Disponíveis		
	324	
Número de Equipamentos		
	3,70	
	4	
Capacidade de Produção		
	362.880	t
Capacidade Ociosa		
	62.880	t
Dimensionamento do número de Caminhões		
DF	70,0%	
UT	88,0%	
Rend	61,6%	
Produtividade Efetiva	55	t/h
Horas Disponíveis		
	443,52	
Número de Equipamentos		
	12,30	
	12	
Capacidade de Produção		
	372.557	t
Capacidade Ociosa		
	72.557	t

Foi simulado a diminuição na produtividade efetiva da frota. Os indicadores de Disponibilidade Física e Utilização foram mantidos iguais ao cenário de controle. Serão necessários 4 escavadeiras e 12 caminhões com base nesses índices operacionais. Uma frota além da demandada pelo controle. Isso pode significar uma produção real acima da estimada.

Uma maior quantidade de equipamentos sugere maiores gastos com insumos e manutenção e uma possível carência de estoque suficiente para o material lavrado

CONCLUSÃO

A extração mineral a céu aberto é caracterizada por ser uma atividade de alto custo de investimento no qual o processo de tomada de decisão possui uma elevada complexidade. Para auxiliar nas tomadas de decisão é necessário que haja planejamento.

Planejar, é prever o futuro e no caso do planejamento de mina, o plano de lavra deve se basear em estudos confiáveis, afim de garantir a sua implantação e desenvolvimento de maneira adequada e compatível com os recursos técnicos e econômicos disponíveis.

Os sistemas de despacho é uma maneira que a mineração encontrou de ter controle sobre a performance dos equipamentos de lavra. Esse sistema deve ser robusto e gerar dados confiáveis que serão tratados e transformados em índices operacionais. A seleção desses índices não pode ser feita de maneira aleatória e deve ter como objetivo a melhoria do processo. Esses, devem ser acompanhados de maneira constante até o cumprimento da meta. A partir desses indicadores é possível estimar a produção e os custos da lavra em qualquer horizonte de tempo desejado, sendo extremamente útil para o planejamento de longo, médio e curto prazo. A criação de um banco de dados se mostra como uma atividade necessária com o objetivo de dispor de uma base comparativa com o intuito de verificar lacunas de desempenho ou oportunidades para o crescimento da produção.

Este estudo apresente a importância do monitoramento das operações visando o dimensionamento adequado para a frota de caminhões e escavadeiras em um horizonte mensal. A gestão da produtividade permite o controle de gastos e a diminuição das incertezas do planejamento de produção. A ingerência pode ter como consequência o não cumprimento de metas, o aumento do custo do produto final, o esgotamento de estoques para o material lavrado ou até a inviabilização do empreendimento em casos mais extremos.

Controlar a quantidade de equipamentos em operação significa também controlar as emissões de gases nocivos ao meio ambiente, expelidos pela queima de combustível fóssil utilizado no motor de caminhões e escavadeiras. Além da gestão de custos, reduzir a frota representa responsabilidade ambiental.

Algumas incertezas das operações de lavra são inerentes ao processo de mineração, mas com o avanço da tecnologia elas podem ser mitigadas. Esse é o caso do desempenho de caminhões e escavadeiras. Um dos principais fatores que influenciam na variabilidade das taxas de produção é o humano. Contudo, máquinas autônomas já são uma realidade. Essas operam sem a gerência de um condutor e são controladas por inteligência artificial com o auxílio de

radares e GPS. Essa nova tecnologia pode significar uma menor variabilidade no desempenho desses equipamentos e conseqüentemente um ganho na produtividade e na redução dos custos.

Esse trabalho reflexiona sobre a importância do controle de performance dos equipamentos de transporte e carga dentro de uma mina. O domínio sobre os índices operacionais auxilia nas tomadas de decisão. A gestão da frota de equipamentos representa ganhos operacionais, financeiros e ambientais e não deve ser interrompida antes do final da vida útil da mina, visto que seus benefícios serão vistos tanto a longo quanto a curto prazo.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- ADONES, R. Curso de Especialização em Lavra de Mina a Céu Aberto: Planejamento de Lavra a Céu Aberto. Notas de Aula. Universidade Federal do Pará. 2019
- BORGES, Thiago Campos. ANÁLISE DOS CUSTOS OPERACIONAIS DE PRODUÇÃO NO DIMENSIONAMENTO DE FROTAS DE CARREGAMENTO E TRANSPORTE EM MINERAÇÃO. 2013. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Engenharia Mineral, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Our, 2013.
- CALDEIRA, J. 100 INDICADORES DA GESTÃO: KEY PERFORMANCE INDICATORS. 1ª ed. Coimbra: Actual, 2012.
- CAMPELO, Ana Carla de Melo Moreira; MARIN, Tatiane; TOMI, Giorgio Francesco Cesare de. UTILIZAÇÃO DE DADOS DO SISTEMA DE DESPACHO PARA ESTIMATIVA DE PRODUTIVIDADE DE TRANSPORTE NO PLANO DE LAVRA DE CURTO PRAZO. Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração, [S.L.], v. 15, n. 2, p. 86-90, 2018. Editora Cubo. <http://dx.doi.org/10.4322/2176-1523.1560>.
- CATALOGO DE MINERAÇÃO BRASIL (Belo Horizonte). Caterpillar apresenta o modelo hidráulico de mineração Cat 6030. 2020. Disponível em: <https://catalogodeminerao.com.br/artigo/caterpillar-apresenta-o-modelo-hidraulico-de-mineracao-cat-6030.html>. Acesso em: 06 jul. 2021.
- CHANGANANE, Arsénio Paulo. ESTUDO DOS PARÂMETROS ENVOLVIDOS NA DETERMINAÇÃO DA FUNÇÃO BENEFÍCIO NA MINERAÇÃO. 2017. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.
- COSTA, Bruno; GANGA, Gilberto Miller Devós. BENEFÍCIOS DA IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA DE DESPACHO: estudo de caso em uma empresa de mineração. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 30., 2010, São Carlos. Anais [...] . São Carlos: Abepro, 2010. v. 12, p. 51-66.
- COSTA, Felipe Pereira da; SOUZA, Marccone Jamilson Freitas; PINTO, Luiz Ricardo. UM MODELO DE PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA PARA ALOCAÇÃO ESTÁTICA DE CAMINHÕES VISANDO AO ATENDIMENTO DE METAS DE

PRODUÇÃO E QUALIDADE. Rem: Revista Escola de Minas, [S.L.], v. 58, n. 1, p. 77-81, mar. 2005. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0370-44672005000100013>.

- COSTA, Flávio Vieira. ANÁLISE DOS PRINCIPAIS INDICADORES DE DESEMPENHO USADOS NO PLANEJAMENTO DE LAVRA. 2015. 98 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Engenharia Mineral, Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015.
- COUTINHO, Heitor Lobo. MELHORIA CONTÍNUA APLICADA PARA CARREGAMENTO E TRANSPORTE NA OPERAÇÃO DE MINA A CÉU ABERTO. 2017. 94 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Engenharia Mineral, Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.
- CURI, Adilson. MINAS A CÉU ABERTO: PLANEJAMENTO DE LAVA. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.
- ENRÍQUEZ, Maria Amélia Rodrigues da Silva. MINERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL - É POSSÍVEL CONCILIAR? Revista Iberoamericana de Economía Ecológica, Rio de Janeiro, v. 12, n. 1, p. 51-66, 08 ago. 2009. Anual. Disponível em: <https://redibec.org/ojs/index.php/revibec/article/view/245>. Acesso em: 19 jun. 2021.
- FELSCH JUNIOR, Walter Schmidt. ANÁLISE DO DESEMPENHO DOS OPERADORES DE EQUIPAMENTOS DE MINA E SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS FUTUROS DE LAVRA. 2014. 124 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Engenharia Mineral, Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014.
- HARTMAN, H. L.; MUTMANSKY, J. M. INTRODUCTORY MINING ENGINEERING. 2nd ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2002.
- LAGES, Augusto Ribeiro. ESTUDO PRELIMINAR DA INFLUÊNCIA DO PORTE DE VEÍCULOS DE CARREGAMENTO E TRANSPORTE NOS CUSTOS OPERACIONAIS DE MINA A CÉU ABERTO. 2018. 74 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Minas, Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.
- LIEBHERR (Brasil). HS 8300 Dragline de Mineração. 2021. Disponível em: <https://www.liebherr.com/pt/bra/produtos/equipamento-de-mineracao/mining-dragline/details/dragline-de-mineracao-hs-8300.html>. Acesso em: 06 jul. 2021.

- LOPES, Elison Batista. PROPOSTA DE ARRANJO FÍSICO PARA REDUÇÃO DE DISTÂNCIAS MÉDIAS DE TRANSPORTE (DMT): UM ESTUDO DE CASO EM UMA EMPRESA PRODUTORA DE CALCÁRIO NA REGIÃO DO CENTRO-OESTE DE MINAS. 2014. 39 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Produção, Centro Universitário de Formiga - Unifor, Formiga, 2014.
- LOPES, J. R. VIABILIZAÇÃO TÉCNICA E ECONÔMICA DA LAVRA CONTÍNUA DE MINÉRIO DE FERRO COM O USO DE SISTEMA DE BRITAGEM MÓVEL “IN PIT” AUTO PROPELIDO. 2010. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.
- MANDARINO, Matheus Ferreira. ANÁLISE DE MÉTODOS PARA PLANEJAMENTO DE CURTO PRAZO: UMA ABORDAGEM PARA O LINE UP. 2018. 46 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Minas, Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.
- MOREIRA, Felipe Nako. DIMENSIONAMENTO DE FROTA DE TRANSPORTE E CARREGAMENTO PARA OPERAÇÕES UNITÁRIAS DE UMA MINAS EM EXPANSÃO. 2018. 62 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Minas, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.
- NADER, Beck; TOMI, Giorgio de; PASSOS, Alexandre Orlandi. INDICADORES-CHAVE DE DESEMPENHO E A GESTÃO INTEGRADA DA MINERAÇÃO. Revista Escola de Minas, Ouro Preto, v. 65, n. 4, p. 537-542, out. 2012. Trimestral.
- NADER, Bek; SACHS, Paulo F. T. SISTEMA DE GESTÃO DA PRODUÇÃO E A CADEIA DE VALOR MINERAL. São Paulo, 2005.
- NEWMAN, A.; RUBIO, E.; CARO, R.; WEINTRAUB, A.; UREK, K. A REVIEW OF OPERATIONS RESEARCH IN MINE PLANNING. INTERFACES, n.3, v. 40, p. 222-245, 2010.
- PERONI, Rodrigo de Lemos. Lavra a Céu Aberto. Porto Alegre. 2007 (Apostila da disciplina ENG05007 – Lavra a Céu Aberto)
- PINHEIRO, Marília Guimarães et al (comp.). SISTEMA DE BANCO DE DADOS. São Paulo: Pearson Education, 2005. 513 p. Tradução de: Ramez Elmasri Shamkant B. Navathe. Disponível em: http://tonysoftwares.com.br/attachments/article/5297/Sistema_de_banco_de_dados_Navathe.pdf. Acesso em: 05 jul. 2021.

- PINTO, Cláudio Lúcio Lopes; DUTRA, José, Ildelfonso Gusmão. Operações e Métodos de Lavra a Céu Aberto. Belo Horizonte. 2008 (Apostila do curso: Introdução ao Planejamento e Operações de Lavra).
- RACIA, Ismael Momade. DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO DE DIMENSIONAMENTO DE EQUIPAMENTO DE ESCAVAÇÃO E DE TRANSPORTE EM MINERAÇÃO. 2016. 108 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.
- RIO DE JANEIRO. Gilson Ezequiel Ferreira. Ministério da Ciência e Tecnologia. Elaboração e Avaliação Econômica de Projetos de Mineração. In: RIO DE JANEIRO. Adão B. da Luz. Ministério da Ciência e Tecnologia (ed.). Tratamento de Minérios. 5. ed. Rio de Janeiro: Coordenação de Processos Mineraiis, 2010. Cap. 20. p. 899-932.
- RODRIGUES, Lásara Fabrícia. ANÁLISE COMPARATIVA DE METODOLOGIAS UTILIZADAS NO DESPACHO DE CAMINHÕES EM MINAS A CÉU ABERTO. 2006. 103 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção, Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.
- SANTOS, Bruno Sheslon Lima dos. PLANEJAMENTO DE LAVRA A CÉU ABERTO PARA JAZIDA DE CALCÁRIO. 2015. 69 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Minas, Centro Universitário Luterano de Palmas, Palmas, 2015.
- SEVA (Minas Gerais). PRO II: computador de bordo. Computador de Bordo. 2021. Disponível em: <http://projeto seva.com.br/pro-ii/>. Acesso em: 30 jun. 2021.
- SILVA, Nelson Camurugi Senhorino. METODOLOGIA DE PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO DE LAVRA INCORPORANDO RISCOS E INCERTEZAS PARA A OBTENÇÃO DE RESULTADOS OPERACIONAIS. 2008. 128 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mineral, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- TEIXEIRA, Ricardo Luiz Perez; ASSIS, Hellen de Araújo; ASSIS, Helder de Araújo; HASEGAWA, Haroldo Lhou; SIMÕES, Anna Carolina; GOUVEIA, Leonardo Lúcio de Araújo. AVALIAÇÃO DA MELHORIA DE DESEMPENHO DA FROTA DE TRANSPORTE E CARREGAMENTO DE UMA MINERADORA ALIANDO FERRAMENTAS ESTATÍSTICAS AO SOFTWARE DE DESPACHO

- ELETRÔNICO. Brazilian Journal Of Development, [S.L.], v. 5, n. 12, p. 30928-30939, 2019. Brazilian Journal of Development. <http://dx.doi.org/10.34117/bjdv5n12-199>.
- VALE (Brasil). APLICAÇÃO DE TELEMETRIA EM EQUIPAMENTOS DE MINERAÇÃO. Marabá: Vale, 2019. 55 p.
 - VALE (Brasil). VALE TERÁ A PRIMEIRA MINA OPERANDO SOMENTE COM CAMINHÕES AUTÔNOMOS NO BRASIL. 2018. Disponível em: <http://www.vale.com/brasil/pt/aboutvale/news/paginas/vale-tera-a-primeira-mina-operando-somente-com-caminhoes-autonomos-no-brasil.aspx>. Acesso em: 22 ago. 2021.
 - WEBER, A.; THOMAS, R. KEY PERFORMANCE INDICATORS: MEASURING AND MANAGING THE MAINTENANCE FUNTION. IVARA Corporation. Ontario, 2005.