



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
UNIDADE ARAXÁ**

**DANIEL LEMOS FERREIRA**

**DIMENSIONAMENTO DE FROTA UTILIZANDO INDICADORES OPERACIONAIS  
DE UMA MINA A CÉU-ABERTO NO ALTO PARANAÍBA**

**ARAXÁ/MG**

**2021**

**DANIEL LEMOS FERREIRA**

**DIMENSIONAMENTO DE FROTA UTILIZANDO INDICADORES OPERACIONAIS  
DE UMA MINA A CÉU-ABERTO NO ALTO PARANAÍBA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Me. Fernando Brandão Rodrigues da Silva

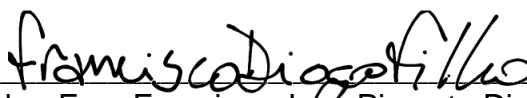
Coorientador: Eng. Francisco José Pimenta Diogo Filho

Araxá, 06 de setembro de 2021.



---

Orientador: Me. Fernando Brandão Rodrigues da Silva  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – Campus Araxá



---

Coorientador: Eng. Francisco José Pimenta Diogo Filho  
Companhia Brasileira de Mineração e Metalurgia – CBMM



---

Avaliador: Me. Allan Erlichman Medeiros Santos  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – Campus Araxá

DocuSigned by:



17DE64E0288C429...

---

Avaliador: Me. Geraldo Dutra Neto  
Instale Tecnologia

## RESUMO

Sistemas de despacho são importantes ferramentas quando se deseja diminuir os custos das operações unitárias de carregamento e transporte. O trabalho em questão teve como objetivo principal dimensionar a frota de carregamento e transporte a fim de se chegar em um número ótimo para cada um dos modelos de frota de uma mineração de grande porte da região do Alto Paranaíba, em Minas Gerais. Neste estudo foram utilizados dados de janeiro a julho de 2020, sendo esses provenientes do software de despacho EasyMine, da Instale Tecnologia. Para o dimensionamento, foram utilizados os indicadores operacionais dos equipamentos, como disponibilidade física, fator de utilização física, produtividade efetiva e rendimento operacional, destacando a importância desses parâmetros nas operações da mina. Através da análise dos resultados, foram sugeridas medidas com objetivo de melhorar os indicadores, contribuindo financeiramente nos resultados da empresa. Por fim, o estudo mostrou como resultado que seriam necessários dez equipamentos da frota 730E, 21 equipamentos da frota CAT 777F, sendo esses equipamentos de transporte e 28 equipamentos do modelo CAT 966H, e dez para a frota CAT 320D, sendo esses equipamentos de carga. Concluiu-se no trabalho que melhores valores para os indicadores estudados, resultariam em um menor número de equipamentos para se transportar a massa planejada, reduzindo custos e aumentando a produtividade da mina.

**PALAVRAS-CHAVE:** Frota. Indicadores. Sistema de despacho. *EasyMine*.

## **ABSTRACT**

Dispatch systems are important tools when you want to reduce the costs of unit loading and transport operations. The main objective of the work in question was to dimension the loading and transport fleet in order to arrive at an optimal number for each of the fleet models of a large mining company in the Alto Paranaíba region, in Minas Gerais. In this study, data from January to July 2020 were used, which came from the dispatch software EasyMine, by Install Tecnologia. For the dimensioning, the equipment operational indicators were used, such as physical availability, physical utilization factor, effective productivity and operational efficiency, highlighting the importance of these parameters in the mine's operations. Through the analysis of the results, measures were suggested with the objective of improving the indicators, contributing financially to the company's results. Finally, the study showed as a result that ten pieces of equipment would be needed from the 730E fleet, 21 pieces of equipment from the CAT 777F fleet, which are transport equipment and 28 pieces of equipment from the CAT 966H model, and ten for the CAT 320D fleet, which are cargo equipment. It was concluded in the work that better values for the studied indicators would result in a smaller number of equipment to transport the planned mass, reducing costs and increasing the mine's productivity.

**KEYWORDS:** Fleet. Indicators. Dispatch system. EasyMine.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Gráfico de relação da fragmentação com os custos das operações unitárias .....	14
Figura 2 - Composição dos custos totais em kR\$ e % .....	15
Figura 3 Ciclo de carregamento e transporte .....	16
Figura 4 Compatibilidade entre caminhões e escavadeiras .....	17
Figura 5 Etapas do ciclo de carregamento .....	18
Figura 6 Frota de carregamento estudada no trabalho .....	19
Figura 7 Frota de transporte usadas na empresa e estudadas no trabalho .....	20
Figura 8 Demonstração do <i>software EasyMine</i> .....	23
Figura 9 Fluxograma representativo dos procedimentos seguidos para realização do trabalho .....	26
Figura 10: Representação esquemática das horas totais e cálculo do OEE .....	28
Figura 11: Horas de manutenção corretiva e preventiva totais ao longo dos meses .....	34
Figura 12: Horas ociosas totais ao longo dos meses .....	35
Figura 13: Gráfico de pluviosidade mensal versus razão entre horas ociosas por condições climáticas e horas trabalhadas .....	36
Figura 14: Gráfico de Pareto para horas ociosas totais .....	37
Figura 15: Tempo gasto em % para cada etapa do ciclo para as frotas de transporte CAT 777F e 730E .....	38
Figura 16: Variação dos indicadores ao longo dos meses .....	39
Figura 17: Indicadores de disponibilidade física, fator de utilização e rendimento operacional por equipamento .....	40
Figura 18: Parâmetros que compõem o resultado do OEE .....	44

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tempo de ciclo para equipamentos de transporte .....	41
Tabela 2: Cálculo da taxa horária nominal e efetiva para os equipamentos de transporte .....	42
Tabela 3: Cálculo da produtividade nominal e efetiva para os equipamentos de carga .....	42
Tabela 4: Cálculo do OEE para os equipamentos estudados .....	43
Tabela 5: Dimensionamento da frota de carregamento e transporte .....	45
Tabela 6: Comparativo entre número de equipamentos de transporte calculado e utilizado na prática da empresa.....	46
Tabela 7: Comparativo entre quantidade de equipamentos calculada para as frotas de carregamento .....	46

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DMT	Distâncias média de transporte
h	Horas
HC	Horas calendário
HM	Horas de Manutenção
HT	Horas Trabalhadas
HO	Horas Ociosas
MAP	Fosfato monoamônico
OEE	<i>Overall Equipment Efficiency</i>
SSP	Super fosfato simples
STP	Super fosfato triplo
t/h	Tonelada por hora

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	9
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA</b> .....	11
2.1. Determinação dos métodos de lavra.....	11
2.2. Mineração a céu aberto.....	12
2.3. Operações unitárias da lavra a céu aberto.....	13
2.4. Operações de carregamento e transporte.....	14
2.4.1. OPERAÇÃO DE CARREGAMENTO.....	17
2.4.2. OPERAÇÃO DE TRANSPORTE .....	19
2.4.2.1. <i>Vantagens e desvantagens do transporte por caminhões</i> .....	20
2.5. Sistemas de despacho .....	21
2.6. Indicadores operacionais .....	23
2.6.1. DISPONIBILIDADE FÍSICA .....	24
2.6.3. RENDIMENTO OPERACIONAL.....	24
2.6.5. <i>OVERALL EQUIPMENT EFFICIENCY (OEE)</i> .....	25
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	26
3.1. Levantamento e tratamento dos dados .....	27
3.2. Manipulação dos indicadores operacionais básicos .....	27
3.3. Cálculo do rendimento operacional.....	29
3.4. Cálculo da produtividade horária efetiva e nominal.....	30
3.5. Cálculo do OEE.....	31
3.6. Dimensionamento da frota por indicadores operacionais.....	32
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	33
4.1. Manipulação dos indicadores operacionais básicos .....	33
4.2. Cálculo do rendimento operacional.....	39
4.3. Cálculo da produtividade horária efetiva e nominal.....	41
4.4. Cálculo do OEE.....	43
4.5. Dimensionamento de frota por indicadores operacionais.....	45
<b>5. CONCLUSÃO</b> .....	48
<b>6. REFERÊNCIAS</b> .....	50



## 1. INTRODUÇÃO

A mineração tem passado por constantes transformações em busca de competitividade no mercado, o que tem incentivado estudos visando o aumento da produtividade e redução de custos em suas operações, mantendo e aprimorando seus critérios de segurança e ambientais. Para alcançar esse objetivo, são necessários diversos tipos de estudos dos parâmetros e indicadores que influenciam nesses números, pois em qualquer empreendimento minerário alguns aspectos possuem maior custo associado e por isso são amplamente estudados.

Atualmente na mineração, as operações de carregamento e transporte nas minas são realizadas com uso de carregadeiras e caminhões, respectivamente, sendo que chegam a representar 66% dos custos totais do empreendimento. Dessa forma, há medidas que podem ser tomadas para melhor controle dos parâmetros envolvidos nessa etapa da operação, resultando em uma redução de custos (BORGES, 2013).

As etapas de carregamento e transporte são componentes das operações unitárias de extração e, além disso, essas operações também englobam a perfuração e o desmonte, podendo esse último ser inclusive desmonte mecânico, dependendo da competência da rocha. As operações unitárias, segundo Botelho (2014) são ligadas entre si e visam atender às demandas da planta de beneficiamento para facilitar e aperfeiçoar o processo.

Muitas empresas têm utilizado sistemas de despacho, o qual é uma ferramenta que pode ser controlada remotamente, em uma sala de comando, ou nos mais modernos, através de um sistema totalmente autônomo, para controlar os indicadores visando atingir as melhorias desejadas na produção. Este sistema facilita a gestão de frotas, reduz os custos de operação da mina, aplica ajustes operacionais em tempo real, auxilia os operadores e interfere diretamente na produtividade, de modo a obter resultados mais satisfatórios e precisos.

Alguns dos parâmetros que podem ser controlados e analisados através do sistema de despacho são os indicadores operacionais. Estes parâmetros, se bem controlados e interpretados, resultam em ganhos significativos para a empresa, pois auxiliam na tomada de decisões, reduzem os custos e, conseqüentemente, maximizam os lucros de uma mina. Através desses indicadores, o sistema de

carregamento e transporte pode ser dimensionado, adaptando estes à realidade da mina em questão.

A região do Alto Paranaíba possui minas de rocha fosfática destinada à produção de concentrado fosfático, principal matéria-prima para fabricação de fertilizantes. Nessa região os complexos de mineração possuem minas em lavra a céu aberto, plantas de beneficiamento de minério fosfático e transporte de concentrado via mineroduto. Os produtos são: concentrado fosfático convencional e concentrado fosfático ultrafino.

A aplicação de fertilizantes se dá a partir da necessidade de compensar a perda de fósforo e outros elementos presentes de forma natural no solo, sendo assim possui papel primordial na agricultura. A carência de fertilizantes fosfatados nos terrenos de cultura tem impacto direto no rendimento e produção agrícolas. Por isso, a produção do mesmo deve ser constante, eficaz e efetiva de modo a suprir às necessidades do mercado. Além disso a margem de contribuição dos fertilizantes é relativamente baixa, por isso é de suma importância realizar estudos para a redução dos custos na sua produção.

O presente trabalho tem como principal objetivo o dimensionamento da frota de transporte de uma mina à céu aberto na região do Alto Paranaíba a partir da análise de indicadores extraídos do software *EasyMine*, atual sistema de despacho utilizado pela mineradora. Esse software, segundo a empresa Instale Tecnologia (empresa brasileira atuante em gestão de frota de mineração), é um software para monitoramento e gerenciamento de frota e possui tecnologia inovadora para o segmento. Destacam-se como objetivos específicos deste trabalho:

- Coleta e tratamento dos dados extraídos do software de despacho, utilizando o *Excel*;
- Manipulação dos indicadores operacionais básicos;
- Cálculo do Rendimento Operacional dos equipamentos estudados;
- Cálculo da produtividade horária efetiva, ou seja, o quanto os equipamentos são capazes de produzir em t/h, na prática;
- Cálculo do *Overall Equipment Effectiveness* (OEE);
- Dimensionamento da frota por indicadores operacionais;

## **2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA**

O presente capítulo apresenta e conceitua os aspectos gerais das operações de uma mina a céu aberto tendo como foco principal as operações de carregamento e transporte e seus indicadores operacionais.

### **2.1. Determinação dos métodos de lavra**

A mineração, segundo Curi (2017), está dividida em cinco fases interligadas em termos de execução. São elas:

- Prospecção: foco na descoberta de jazidas minerais
- Exploração: trabalho geológico detalhado sobre as ocorrências minerais para definição da jazida mineral.
- Desenvolvimento: são todos os trabalhos referentes a preparação para a instalação da jazida, visando seu maior aproveitamento.
- Lavra: engloba o conjunto de operações unitárias. Aplicação das ações necessárias para o maior aproveitamento econômico da jazida.
- Fechamento de mina: consiste no planejamento da desativação total das estruturas de uma mina, de maneira a seguir um roteiro que envolve aspectos ambientais e socioculturais.

A seleção do método de lavra do bem mineral é um dos principais elementos na análise econômica de um empreendimento minerário e determina o desenvolvimento das operações (BORGES, 2013). A escolha do tipo de lavra, subterrânea ou a céu aberto, depende de fatores inerentes a jazida a ser explorada, geológicos, econômicos, políticos e socioambientais, assim como também a influência da resistência das rochas na estabilidade das escavações.

Pode-se dizer que o método ideal de lavra é sempre aquele que proporciona maior aproveitamento econômico da jazida, levando em consideração a segurança e os parâmetros ambientais.

Para Curi (2017), o método de lavra é determinante na definição dos ciclos de trabalho. Essa importância se deve à relação direta do método com o aproveitamento da jazida. O presente trabalho terá como referência a mineração a céu aberto.

## 2.2. Mineração a céu aberto

A mineração à céu aberto realiza suas operações unitárias de lavra na superfície, sem necessidade de acesso por meio subterrâneo para ser realizada e é o método mais utilizado no Brasil e no mundo. Segundo Curi (2017), isso se deve a dois fatores principais: a estrutura dos depósitos a serem lavrados e a eficiência crescente das operações de lavra a céu aberto.

De acordo com Curi (2017), a mineração a céu aberto pode ser caracterizada como uma operação a qual o minério, ou o estéril, é extraído a partir da superfície da terra, onde se tem capital intensivo e de longo prazo, e sujeito a incerteza devido aos diversos parâmetros operacionais que podem influenciar na sua eficácia. Sabe-se que a fase de planejamento da mina é de notória importância, pois busca a redução de custos associados às operações.

Existem diversos fatores operacionais que podem influenciar na produção de uma mina à céu aberto, como tempo de ciclo dos caminhões, confiabilidade e disponibilidade dos ativos, utilização dos equipamentos, a quantidade de carga transportada por viagem, a produtividade da frota, entre outros (COUTINHO, 2017).

Para realização da lavra a céu aberto são necessárias, segundo Silva (2019), as seguintes etapas de operação:

- Supressão vegetal;
- Decapeamento;
- Drenagem de mina;
- Desmonte;
- Carregamento;
- Transporte;
- Disposição de estéril.

Existem diferentes métodos para realizar a mineração à céu aberto, sendo que os mais comuns são realizados a seco. O *open pit mine* ou lavra por bancadas é o

mais usado em depósitos metálicos e a lavra em tiras é comumente aplicado em depósitos tabulares (BORGES, 2013).

A empresa multinacional que forneceu os dados, provenientes do ano de 2020, para a pesquisa realizada no presente trabalho lavra o minério fosfático a céu aberto utilizando o método por bancadas. Os principais produtos da empresa são matérias primas para a fabricação de fertilizantes fosfatados, como MAP, SSO e TSP.

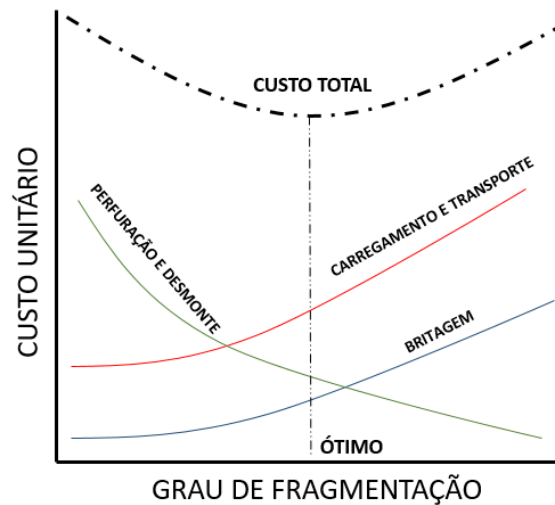
### **2.3. Operações unitárias da lavra a céu aberto**

As operações de lavra são divididas em uma série de atividades que tem por objetivo desmontar e transportar o material desejado, seja o minério às etapas de processamento ou o estéril à depósitos específicos. Essas atividades são conhecidas como operações unitárias de lavra e são a base do ciclo produtivo de uma mineração (LAGES, 2018). As operações unitárias consistem em: perfuração, desmonte, carregamento e transporte. Essas operações devem ser relacionadas para que ocorra uma otimização do processo como um todo, já que o desempenho individual de cada uma tem influência no resultado geral de todas as operações.

O desmonte tem por objetivo a fragmentação do material. Uma boa operação de desmonte gera uma distribuição granulométrica uniforme, sem excesso de finos ou de elevado tamanho (matacos) e depende de um bom planejamento e execução da operação de perfuração (BOTELHO, 2014).

Por isso qualquer tentativa de redução de custos ou otimização operacional deve ser analisada considerando-se todas as operações, já que o custo de operação se comporta de forma diferente quando analisado em função da fragmentação do material desmontado, conforme apresentado no gráfico custo unitário versus grau de fragmentação, ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - Gráfico de relação da fragmentação com os custos das operações unitárias



Fonte: Adaptado de Botelho, 2014.

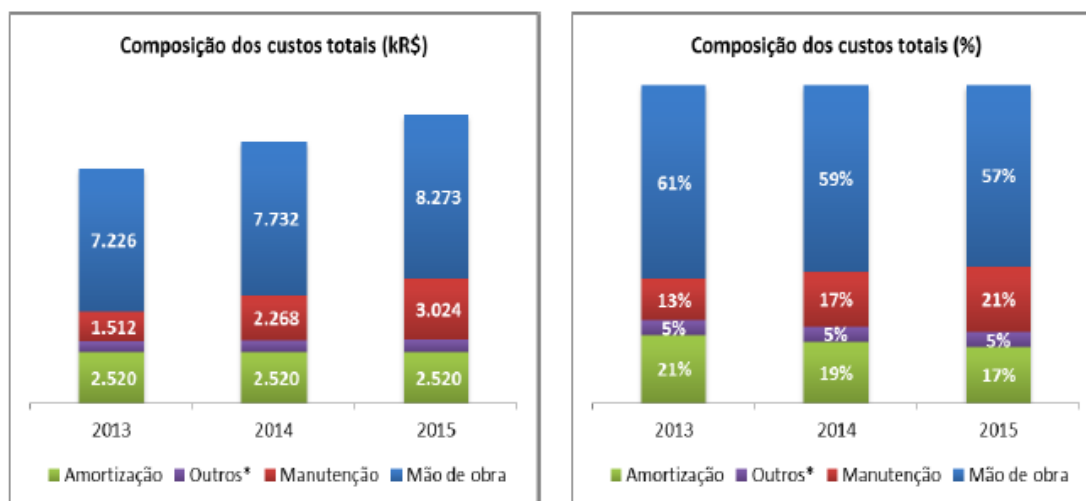
A partir da Figura 1 observa-se que os custos de perfuração e desmonte reduzem à medida que a granulometria aumenta, enquanto os custos de carregamento e transporte aumentam com o aumento da granulometria. Segundo Botelho (2014) isso significa que um custo ótimo deve ser encontrado considerando a relação oposta entre os custos das operações unitárias.

O presente trabalho leva em consideração todas as operações unitárias mas foca no carregamento e transporte já que os mesmos apresentam alto custo de investimento, operação e manutenção.

#### 2.4. Operações de carregamento e transporte

Segundo Torkamani e Askari-Nasab (2012), os equipamentos usados na mineração, que envolvem as operações de carregamento e transporte, são os investimentos mais caros feitos em uma mina, chegando a representar 50 a 60% do seu custo total em empreendimentos minerários. Dessa forma, uma utilização eficiente da frota de equipamentos pode representar uma significativa redução de custos. Confirmando as porcentagens supracitadas, Borges (2013) apresenta dados que demonstram que as operações de carregamento e transporte representam 66% dos custos totais de uma mineração, sendo que o restante dos custos está distribuído entre perfuração (13%) e atividades de apoio (21%). Os custos totais citados pelo autor estão demonstrados na Figura 2.

Figura 2 - Composição dos custos totais em kR\$ e %.



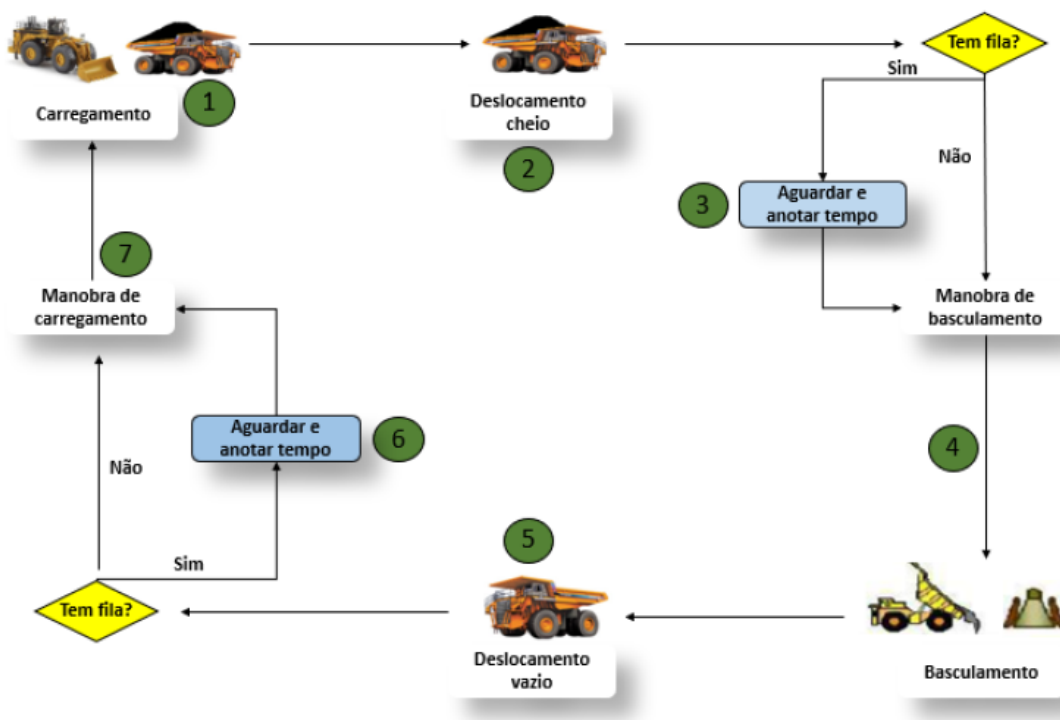
Fonte: Borges, 2013.

A partir da análise da Figura 2 torna-se notável que os custos com a manutenção aumentam com o decorrer do tempo, assim como também os custos com mão-de-obra, embora o percentual de composição tenha sofrido uma alteração muito discreta. Segundo Borges (2013) a variação no custo de manutenção se deve ao desgaste dos equipamentos de carregamento e transporte que, com o passar do tempo, demandam manutenção.

O ciclo básico de carregamento e transporte em uma mina é detalhado por Borges (2013) sendo composto pelas seguintes etapas: o caminhão é conduzido para uma praça de carga, onde se encontram as carregadeiras e se dirige a uma delas, aguarda o processo de carregamento de sua caçamba ser concluído, se desloca para um ponto de descarga, sendo normalmente um britador ou pilha, e despeja o material. Após essa etapa, o ciclo inicia-se novamente.

De acordo com Melo (2020) esse mesmo ciclo pode ser separado por componentes fixos (tempo de fila de carregamento e basculamento, tempo de manobra no carregamento e basculamento e tempo de carregamento) e variados (deslocamento vazio e deslocamento cheio), como mostrado na Figura 3, onde cada tempo enumerado na figura representa uma parte do ciclo total das operações de carregamento e transporte.

Figura 3 Ciclo de carregamento e transporte.



Fonte: Melo, 2020.

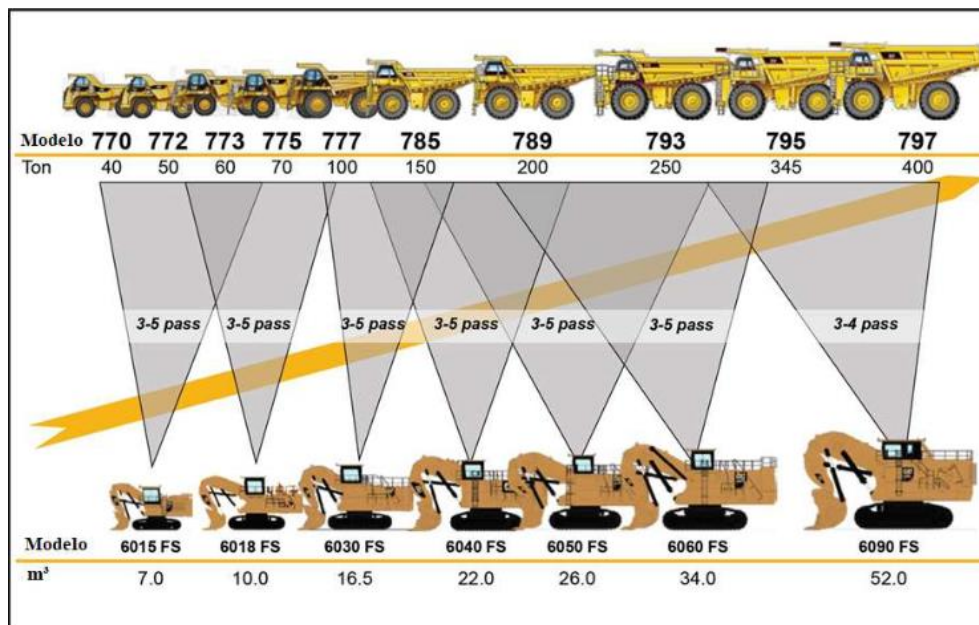
A seleção de equipamentos utilizados no carregamento e transporte não é um processo definido, pois envolve a interação de diversos fatores ou critérios subjetivos, tornando as decisões complexas e únicas a cada projeto (BAZZAZI *et al.*, 2008). Uma das razões para a dificuldade da seleção se deve ao fato de não existirem duas minas



com características idênticas, que demandarão equipamentos iguais, ou seja, cada mina possui características distintas e suas próprias especificidades, sendo necessário frotas de carregamento e transporte específicas para cada situação (AMARAL, 2008).

Segundo Lages (2018), o mercado de mineração conta com uma ampla variedade de equipamentos de carregamento e transporte, devido aos avanços tecnológicos presenciados nas últimas décadas sabe-se que atualmente existem caminhões disponíveis no mercado com capacidade de 10 a 500 toneladas. Para a seleção do caminhão correto considera-se também o equipamento de carregamento compatível que irá trabalhar em conjunto para completar as operações de lavra. Dessa forma, as mineradoras necessitam de uma frota bem dimensionada e o número correto de equipamentos para que ocorra o revezamento eficiente nas frentes de lavra. A Figura 4 exemplifica uma relação de compatibilidade entre caminhões e escavadeiras.

Figura 4 Compatibilidade entre caminhões e escavadeiras.



Fonte: CATERPILLAR Performance Handbook (2014).

#### 2.4.1. OPERAÇÃO DE CARREGAMENTO

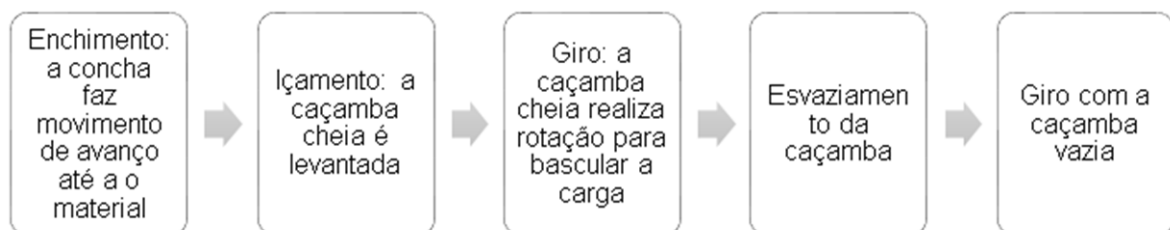
Anterior ao processo de carregamento ocorre a operação de escavação. Para realização de ambos os procedimentos pode-se fazer uso do mesmo equipamento de

carga ou de máquinas distintas. Segundo Borges (2013), os equipamentos mais utilizados nessas operações são escavadeiras a cabo ou hidráulicas, retroescavadeiras hidráulicas, carregadeiras (sobre pneus ou esteira), *moto scrapers*, dragas e monitores hidráulicos.

A atividade de carregamento é descrita por Coutinho (2017) como a retirada e carregamento do material desmontado da frente de lavra e sua condução para o destino final e é uma operação que ocorre associada ao desmonte de rochas e ao transporte. Por isso, de acordo com Melo (2020) a qualidade do desmonte é um fator determinante no carregamento, já que, um desmonte não homogêneo pode gerar atrasos no carregamento, pois blocos de elevado tamanho, chamados de maticos, devem ser separados afim de evitar danos aos equipamentos.

Como descrito anteriormente a operação de carregamento representa alto custo em uma operação de mina e o tempo de ciclo possui papel primordial na otimização desse processo, já que um carregamento ineficiente pode reduzir a capacidade de produção de uma mina. O ciclo de carregamento é dividido em etapas, conforme descritas na Figura 5.

Figura 5 Etapas do ciclo de carregamento.



De acordo com Melo (2020) a experiência dos operadores é um fator de alta relevância na otimização do tempo de carregamento, pois análises mostram que operadores experientes movimentam o material com maior facilidade quando comparados com operadores menos experientes. Por isso entende-se que treinamentos devem ser realizados para otimizar o tempo além de reduzir falhas operacionais.

Na empresa objeto deste estudo são utilizados equipamentos de carregamento da fabricante Caterpillar, sendo o CAT 966H (Figura 6 - A), e o CAT 320D (Figura 6 - B).

Figura 6 Frota de carregamento estudada no trabalho.



#### 2.4.2. OPERAÇÃO DE TRANSPORTE

O objetivo da operação de transporte é transferir o material lavrado de seu lugar de origem até o destino final – seja ele para os britadores ou para pilhas e depósitos. Assim como no carregamento, o transporte acontece de forma cíclica e na mineração é comum que esse processo seja feito por caminhão ou correia, sendo que o primeiro é o mais utilizado em escala mundial (BORGES, 2013).

Segundo Coutinho (2017) o ciclo dos caminhões começa no momento de alocação, feita por sistema de despacho (automático ou manualmente), para realização de alguma atividade. O primeiro deslocamento do caminhão é feito vazio, seguindo para a frente de lavra determinada onde será carregado. Após ser carregado o caminhão segue para o seu ponto de descarga onde ocorre o basculamento da caçamba e esvaziamento completo do material nela contida. O tempo de ciclo, ou seja, o tempo necessário para completar um ciclo de transporte é um dos principais indicadores de produtividade da operação.

O tempo de ciclo médio dos caminhões deve estar entre 20 a 30 minutos no total, porém esse parâmetro não é definitivo, já que se altera de acordo com as necessidades e condição da mina. Para Coutinho (2017) alguns fatores influenciam diretamente no tempo de ciclo dos caminhões. Entre eles a distância média de transporte (DMT), a velocidade média e o tempo de manobra.

Atualmente os caminhões utilizados no transporte em minas possuem ampla variação de capacidade de carga. O que define o tamanho do caminhão, assim como do equipamento de carregamento, é a escala de produção, geometria da cava e

geologia da jazida. A escolha desses equipamentos geralmente é auxiliada pelo fabricante que apresenta uma proposta de aplicação baseada nas necessidades da mina.

O basculamento é uma etapa subsequente ao transporte e possui influência direta no seu tempo, já que essa operação pode gerar atrasos no processo. Segundo Melo (2020) para que o material possa ser basculado nos britadores o equipamento deve estar preparado e com sinal verde. A parada dos britadores pode ocorrer devido a característica do minério (engaiolamento do silo, entupimento da grelha, presença e maticos, material muito fino, entre outros) e essas paradas podem causar filas, aumentando o tempo de ciclo da operação.

Os equipamentos de transporte utilizados pela empresa do estudo em questão são os de modelo CAT 777F da Caterpillar (Figura 7 - B) e 730E da Komatsu (Figura 7 - C).

Figura 7 Frota de transporte usadas na empresa e estudadas no trabalho.



#### 2.4.2.1. *Vantagens e desvantagens do transporte por caminhões*

O transporte via caminhões é o meio mais utilizado atualmente. Isso se deve principalmente às seguintes vantagens oferecidas (SILVA, 2019):

- Flexibilidade operacional: o equipamento pode se locomover de acordo com a necessidade do projeto;
- Independência para operação: se uma unidade for paralisada por qualquer motivo as demais operam de forma independente;
- Menor dependência de outros processos para funcionar: o transporte por caminhões não precisa ser interrompido caso o destino do material não

esteja disponível, já que o caminhão pode depositar o material em locais adjacentes.

- Mão de obra: facilidade em encontrar mão de obra qualificada para realizar a operação e manejar os equipamentos.

Porém, o transporte através de caminhões também traz algumas desvantagens, entre elas (SILVA, 2019):

- Baixa eficiência energética: O peso do próprio equipamento demanda 50% de sua energia;
- Tempo vazio: Equipamento apresenta gastos mesmo enquanto transita vazio, o que aumenta o custo da operação;
- Sua eficiência depende da inclinação da rampa. Quanto maior a sua inclinação pior é o deslocamento do equipamento;
- À medida que a lavra avança a DMT também aumenta o que gera custos adicionais (adição de novos caminhões para que a produção continue nos níveis planejados);
- Construção e manutenção de vias de acesso e sensibilidade ao clima: Caminhos necessitam de vias em boas condições para trânsito, além de umectação das mesmas para redução de poeiras e particulados.

## **2.5. Sistemas de despacho**

Os sistemas de despacho já eram usados na mineração desde a década de 70, quando ainda eram manuais. Nessa época, um operador ficava localizado em uma posição estratégica da mina, normalmente em um lugar mais alto, observando a operação e delegando funções aos equipamentos de acordo com seus critérios. Ainda nessa década, foram desenvolvidos sistemas de despacho semi-automatizados, onde microcomputadores eram usados para sugerir a alocação dos caminhões (Munirathinam e Yingling, 1994, *apud* Rodrigues, 2006).

De acordo com Tu e Hucka (1985, *apud* RODRIGUES, 2006), graças aos avanços tecnológicos computacionais presenciados na década de 90, os sistemas de despacho mais atuais são automatizados, sendo capazes de alocar os caminhões em tempo real, gerando um aumento de 3 a 15% da produtividade desses equipamentos. No entanto, deve-se haver um estudo da viabilidade da instalação desses sistemas,

verificando se o aumento dessa produtividade proporcionada pelo mesmo supera o seu custo.

Esse sistema, como é ressaltado por Rodrigues (2006), utiliza critérios para determinar onde os equipamentos devem se alocar. Os critérios são: qualidade, ritmo de lavra, ritmo de produção, tempo em fila e tempo de ciclo. Levando em conta esses critérios, o algoritmo do despacho trabalha analisando todas as possibilidades de alocações possíveis dos equipamentos em tempo real, sempre tomando a decisão de alocar de forma que aumente sua utilização, minimize os tempos de espera e os tempos de ciclo.

Como destaca Rodrigues (2006), a alocação de caminhões é um processo complexo e de suma importância, sendo que se for bem implementada e otimizada resulta em uma significativa economia.

Segundo Costa *et al.* (2005), um sistema de despacho eficiente reúne um algoritmo de sequenciamento de viagem, um sistema de comunicação entre os equipamentos de carga e transporte e uma central de comandos. Sendo que dessa forma deve-se atender as especificações preestabelecidas pelo cliente realizando o número mínimo de viagens, resultando numa redução de custos, pois num cenário ótimo, não ocorrerá viagens em excesso, e sim o número mínimo necessário de ciclos de carregamento e transporte.

### 2.5.1. SOFTWARE EASYMINE

Desenvolvido pela Instale Tecnologia, empresa brasileira atuando há 14 anos atuando em Gestão de Frota de Mineração, o Easymine® é um *software* para o monitoramento e gerenciamento de frota de mineração que possui tecnologia inovadora para o segmento, pois permite controlar de forma digital e em tempo real toda a gestão de operação da mina.

O *software* funciona a partir da instalação do *hardware* em cada equipamento em operação na mina (Figura 8) que registra as informações e as envia para torre *easymine* móvel (situada nos setores produtivos da mina), sendo que essa manda sinais e informações para a torre fixa que encaminha todos os dados ao servidor.

Figura 8 Demonstração do software *EasyMine*.



Fonte: Adaptado EasyMine, 2021.

O software *EasyMine* é um sistema de gestão de frota que apresenta vantagens como:

- Redução de custos;
- Aumento da produtividade;
- Redução de tempo ocioso;
- Flexibilidade de integração;
- Interface amigável;
- Indicadores de desempenho.

## 2.6. Indicadores operacionais

Segundo Dias (2008), indicadores são uma ferramenta básica utilizada nas empresas no processo de tomada de decisão, podendo ser usada anteriormente ao processo ou após este. Sendo que esses indicadores são valores dispersos ao longo do tempo onde é possível avaliar características ou resultados de um determinado produto ou serviço.

Como destaca Borges (2013), os indicadores operacionais, se bem utilizados e interpretados, podem auxiliar nas decisões para alavancar os lucros de uma mina e diminuir os custos. Com esses parâmetros em mãos, pode-se avaliar a viabilidade operacional do sistema de carregamento e transporte, tomando medidas que mais se adequem à realidade da mina em questão.

No presente trabalho, os indicadores analisados foram: disponibilidade física, fator de utilização, eficiência e produtividade.

#### 2.6.1. DISPONIBILIDADE FÍSICA

A disponibilidade física corresponde à parcela de tempo que o equipamento está apto a trabalhar, ou seja, não está em manutenção. Este indicador é calculado levando em consideração as horas calendário do período analisado e suas respectivas horas de manutenção, seja preventiva, corretiva ou preditiva.

#### 2.6.2. FATOR DE UTILIZAÇÃO

O fator de utilização corresponde ao percentual de horas operadas em relação às horas disponíveis para operar. Geralmente, as ocorrências de paradas de natureza operacional, como espera de construção de praças de carregamento, falta de operador, horário de refeições, chuvas e/ou poeiras em excesso, entre outros, afetam este indicador de forma significativa.

#### 2.6.3. RENDIMENTO OPERACIONAL

É a relação entre as horas efetivamente trabalhadas e as horas programadas, ou seja, o produto da disponibilidade física (DF) pelo fator de utilização (U).

#### 2.6.4. PRODUTIVIDADE

A produtividade na mineração normalmente é expressa de duas formas: em toneladas por hora (t/h) ou em percentual. Quando expressa em percentual esta é determinada a partir da relação entre a capacidade real e a capacidade nominal dos equipamentos. Muitos equipamentos, como caminhões por exemplo, não conseguem transportar a massa correspondente à capacidade nominal devido às restrições mecânicas, em função do tempo de vida deles.



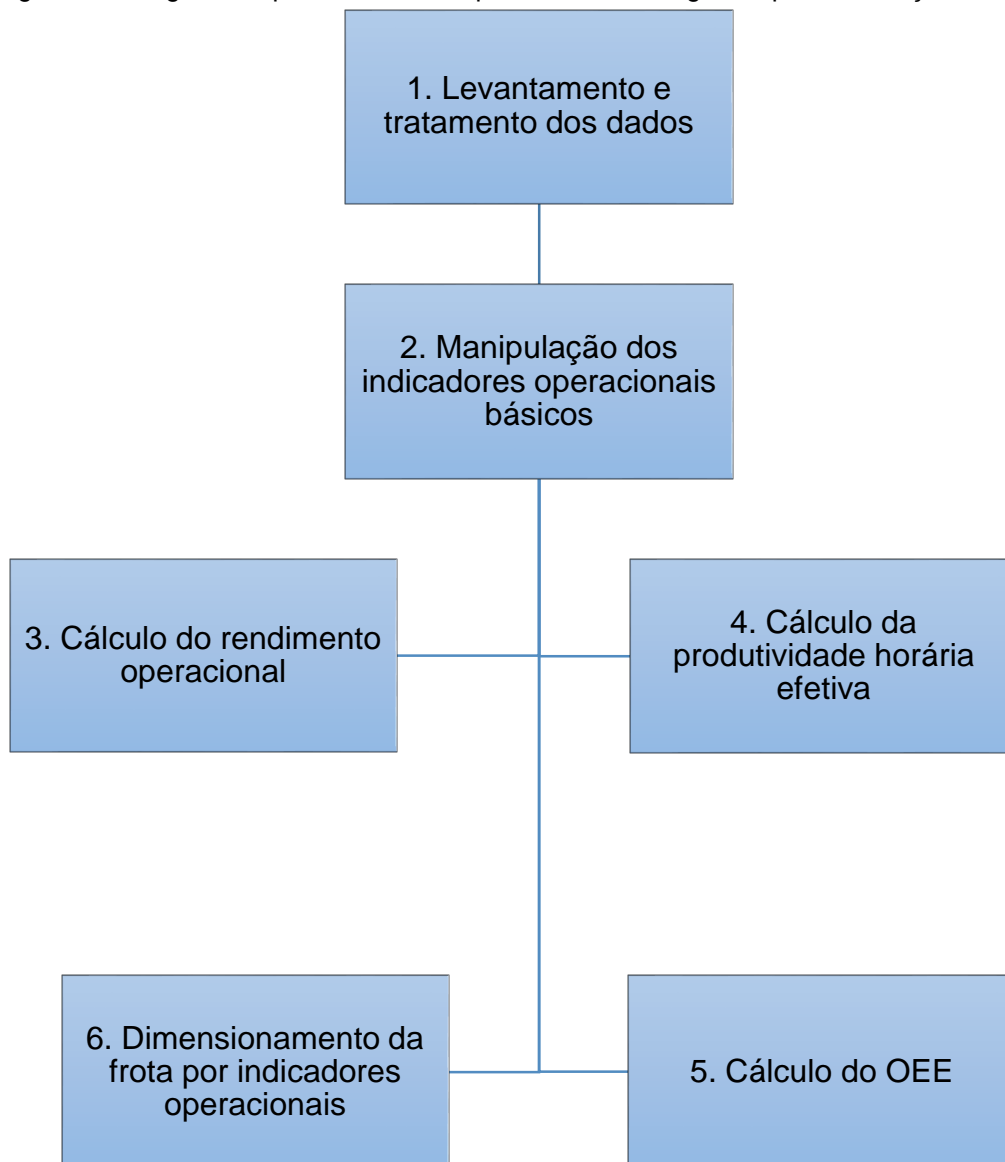
#### 2.6.5. *OVERALL EQUIPMENT EFFICIENCY (OEE)*

Representa o indicador da Eficiência Geral do Equipamento e é dado pelo produto do Rendimento pela Eficiência.

### 3. METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados os procedimentos seguidos para realização do trabalho. Serão apresentados e descritos os métodos de coleta e tratamento dos dados extraídos do software de despacho *EasyMine*. O fluxograma a seguir apresentado na Figura 9 resume as etapas realizadas.

Figura 9 Fluxograma representativo dos procedimentos seguidos para realização do trabalho



Para um melhor entendimento dos processos as etapas enumeradas são descritas a seguir:

- Coleta e tratamento dos dados extraídos do software de despacho, utilizando o *Excel*;
- Manipulação dos indicadores operacionais básicos, que teve como objetivo facilitar futuras análises deles;
- Cálculo do Rendimento Operacional dos equipamentos estudados, sendo esse um indicador importante para se alcançar os resultados almejados;
- Cálculo da produtividade horária efetiva, ou seja, o quanto os equipamentos são capazes de produzir em t/h, na prática;
- Cálculo do *Overall Equipment Effectiveness* (OEE), que mostra a eficiência geral dos equipamentos;
- Dimensionamento da frota por indicadores operacionais, sendo esses calculados nas etapas anteriores.

Cada uma das etapas será melhor explicada nos tópicos subsequentes.

### **3.1. Levantamento e tratamento dos dados**

A primeira etapa para o desenvolvimento do trabalho foi a coleta e tratamento dos dados obtidos através do software *EasyMine*, o sistema de despacho desenvolvido pela Instale Tecnologia, desenvolvedora e criadora dele. Esse programa é utilizado na mina estudada no presente trabalho, situada no Alto Paranaíba. Para esse tratamento, foi utilizado o *Excel*.

### **3.2. Manipulação dos indicadores operacionais básicos**

Para determinação do rendimento operacional, e conseqüentemente o OEE, existem parâmetros básicos que são utilizados para definição dos elementos presentes nas equações. A Figura 10 demonstra um esquema de horas totais por um período de tempo que são usados para chegar na composição dessas fórmulas.

Figura 10: Representação esquemática das horas totais e cálculo do OEE



O presente trabalho utiliza como indicadores operacionais:

- Horas calendário (HC);
- Horas de Manutenção (HM);
- Horas Trabalhadas (HT);
- Horas Ociosas (HO)
- Produção anual em toneladas.

Para cada um desses indicadores, foi feita uma estatística básica descritiva, mostrando ao longo do ano, o desvio padrão, média, mediana, valor máximo e valor mínimo dos dados dos equipamentos. Assim tornou-se possível estudar de forma mais criteriosa os dados obtidos. A análise estatística permitiu a identificação de possíveis falhas de imputação de dados ou outros problemas nos dados, além de ajudar também na análise desses parâmetros, como será mostrado nos resultados.

O parâmetro de Horas Ociosas (HO), impacta diretamente no Fator de Utilização e Produtividade, conseqüentemente impactando no Rendimento Operacional e no OEE. O valor de Horas Ociosas é um dos principais fatores cujos sistemas de despachos objetivam diminuir ao máximo. Dessa forma, foi feito um gráfico de Pareto com as dez principais ocorrências de ociosidade nas frotas de

carregamento e transporte, obtidos através dos dados provenientes do software, que descreve a ocorrência e sua duração em horas, para cada equipamento.

### 3.3. Cálculo do rendimento operacional

O primeiro passo para se chegar no Rendimento Operacional foi calcular os indicadores operacionais para cada modelo de equipamento, utilizando os parâmetros mostrados no tópico anterior. As Equações 1 e 2 mostram como a Disponibilidade Física e o Fator de Utilização, foram calculados respectivamente.

$$\text{Disponibilidade Física} = \frac{HC - HM}{HC} \times 100$$

(1)

Onde:

Disponibilidade Física representa a porcentagem do tempo que o equipamento fica disponível para operar;

HC = horas calendário, correspondendo a horas calculadas no período de tempo;

HM = horas que o equipamento passou por manutenção.

$$\text{Fator de Utilização} = \frac{HT}{HC - HM} \times 100$$

(2)

Onde:

Fator de utilização representa a porcentagem de horas que o equipamento esteve em operação;

HT = total de horas em determinado período de tempo efetivamente trabalhadas;

HM = horas que o equipamento passou por manutenção.

Após a obtenção da Disponibilidade Física e do Fator de Utilização, finalmente foi calculado o Rendimento Operacional, conforme a Equação (3).

$$\text{Rendimento Operacional} = \text{Disponibilidade Física} \times \text{Fator de Utilização}$$

(3)

Em seguida, foi feita também uma estatística básica descritiva de cada um dos indicadores, assim como explicado no tópico anterior, com o intuito de facilitar a análise e excluir possíveis dados que possam prejudicar o estudo. Além disso, foi calculado a correlação entre eles, auxiliando ainda mais o trabalho feito.

### 3.4. Cálculo da produtividade horária efetiva e nominal

Para o correto dimensionamento da frota de transporte em questão, foi feito o cálculo da taxa horária efetiva dos caminhões e dos equipamentos de carga. Para chegar no resultado final, foram calculados alguns parâmetros utilizados na fórmula, como descrito no tópico a seguir.

#### 3.4.1. TEMPO DE CICLO

Como destaca Borges (2013), o tempo médio de viagem é de suma importância na produtividade da frota de transporte, uma vez que quanto maior esse tempo, menos viagens serão realizadas por hora, reduzindo a produtividade horária.

Para o cálculo desse tempo médio de viagem, foi utilizado a Equação 4 que leva em conta a distância média de transporte (DMT) e a velocidade do equipamento carregado e vazio:

$$T_{viagem} = \frac{DMT}{V_{carregado}} + \frac{DMT}{V_{vazio}}$$

(4)

O tempo total de ciclo de transporte é a soma de todos os tempos fixos, sendo esses o tempo de manobra, basculamento e carregamento, mais o tempo médio de viagem. Para se encontrar o número de viagens por hora, o tempo total de ciclo foi dividido por 60 minutos. Logo após, multiplicou-se a capacidade nominal do caminhão, em toneladas, pelo número de viagens por hora, para se obter a produtividade nominal da máquina.

Para a frota de carregamento, o tempo de ciclo total é o tempo de carregamento propriamente dito, somado com o tempo de manobra, sendo que esse tempo de ciclo total foi dado pelo software de despacho.

### 3.4.2. PRODUTIVIDADE HORÁRIA EFETIVA E NOMINAL

Para determinação do valor de produtividade horária efetiva de cada equipamento, tanto para frota de carregamento ou transporte, foi utilizada a Equação 5, que leva em conta a massa total movimentada pelo equipamento em toneladas, dividida pela soma dos tempos de todos os ciclos em horas.

$$Produtividade\ horária\ efetiva = \frac{Massa\ total\ movimentada}{Soma\ dos\ tempos\ de\ todos\ ciclos}$$

(5)

A produtividade horaria nominal foi calculada utilizando a melhor ocorrência da produção para cada equipamento, sendo usado como um *benchmark*, multiplicado pelo número de viagens que cada equipamento é capaz de realizar por hora.

### 3.5. Cálculo do OEE

Para o cálculo do OEE primeiramente foi calculada a eficiência de produção dos equipamentos. Esse cálculo é de suma importância pois tanto a máquina de carregamento quanto a de transporte não trabalham em sua capacidade nominal, existindo perda em sua produtividade. A Equação 6 demonstra como se calcula esse parâmetro.

$$Eficiência\ de\ Produção = \frac{Produtividade\ horária\ efetiva\ em\ toneladas}{Produtividade\ nominal\ (benchmark)}$$

(6)

Onde:

Produtividade horária efetiva em toneladas = produção horária do equipamento no ano, fornecido pelo software, dividido pela soma de todos tempos de ciclo do equipamento;

Produtividade nominal (*benchmark*) = Maior ocorrência de produtividade horária no período estudado para o equipamento;

Com os valores de Rendimento Operacional calculados, finalmente se chegou no cálculo do OEE (*Overall Equipment Effectiveness*), por meio da Equação 7.

$$OEE = \text{Rendimento Operacional} \times \frac{\text{Produtividade efetiva em toneladas}}{\text{Produtividade nominal}}$$

(7)

Onde:

Rendimento Operacional é o produto entre a disponibilidade física e o fator de utilização;

Produtividade efetiva em toneladas = produção do equipamento em questão no ano, fornecido pelo software, dividido pelo tempo médio do ciclo calculado.

Produtividade nominal = calculada através da melhor ocorrência de produção de cada equipamento, dividida pelo tempo de ciclo médio calculado.

Para o OEE, assim como foi feito com os outros parâmetros, foi feito uma análise descritiva básica, facilitando assim uma análise mais consistente e verossímil dos dados apresentados.

### 3.6. Dimensionamento da frota por indicadores operacionais

Finalmente, para se chegar no número ótimo de equipamentos para uma produção planejada utilizando os indicadores previamente descritos, foi utilizado a seguinte fórmula:

$$N_{equip} = \left( \frac{\text{Massa total}}{\text{Horas Trabalhadas}} \right) \times \left( \frac{1}{\text{Produtividade efetiva}} \right)$$

(8)

Por se tratar de números de equipamentos não existem valores decimais, ou seja, deve-se estabelecer o resultado em número inteiro. Segundo Borges (2013), o dimensionamento de frotas por indicadores operacionais de produção é bastante fiel a realidade, sendo que quando maior a aderência dos indicadores estimados aos indicadores praticados, mais próximo será sua produção planejada em relação à realizada.



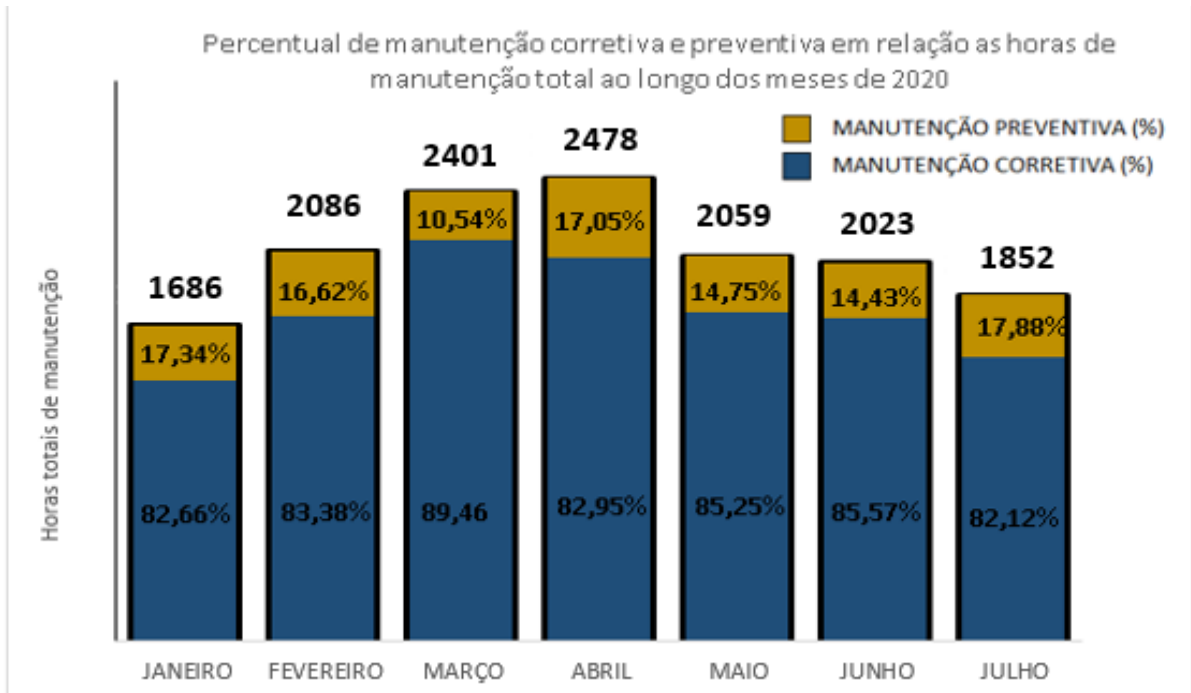
## **4. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

No presente capítulo serão descritas as análises realizadas acerca dos indicadores operacionais e apresentados dos resultados obtidos. Primeiramente foi feito uma análise descritiva do banco de dados, a fim de identificar possíveis dados com potencial de disformidade dos resultados. Foram calculados as médias e os desvios padrão para cada um dos indicadores operacionais básicos e analisado com maior atenção os casos com maiores distorções. Desse modo, as análises culminaram na identificação de ocorrências com algum tipo de falha no lançamento de dados no sistema, totalizando 8% de todo o espaço amostral. Dentre as falhas pode ser citado tempo de carregamento e basculamento inconsistente, e ausências de alguma das etapas das operações unitárias, sendo todas essas excluídas.

### **4.1. Manipulação dos indicadores operacionais básicos**

As horas de manutenção é um parâmetro que influencia diretamente nos indicadores de disponibilidade física, sendo importante quando se quer analisar o comportamento desse indicador, e conseqüentemente, o comportamento do Rendimento Operacional. A Figura 11 mostra o total de horas de manutenção bem como os percentuais de manutenções corretivas e preventivas, com periodicidade mensal no período estudado em 2020.

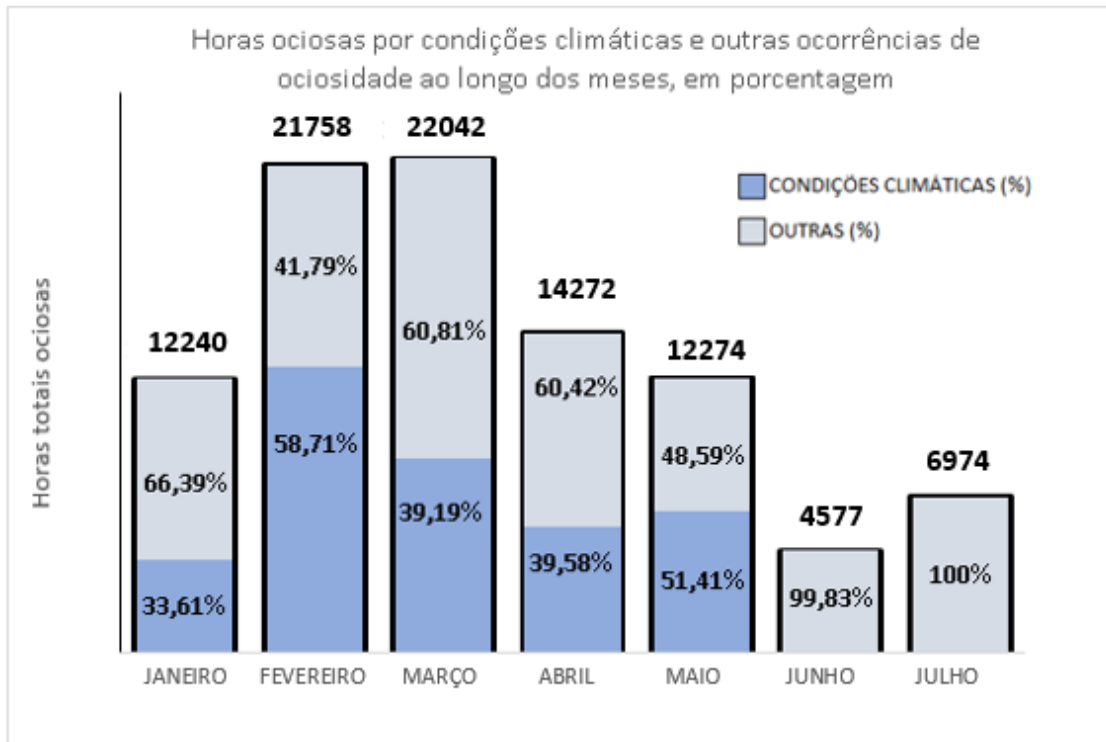
Figura 11: Horas de manutenção corretiva e preventiva totais ao longo dos meses.



Como pode ser observado, durante todos os meses o número de horas de manutenções corretivas foi substancialmente maior que o das manutenções preventivas. Quando comparadas, a manutenção corretiva tem maior impacto financeiro em relação as manutenções preventivas, pois essas tornam o equipamento indisponível de maneira repentina, sem que a parada tenha sido planejada, impactando diretamente na produtividade dele.

O gráfico apresentado na Figura 12 mostra as horas ociosas totais e o percentual de horas por condições climáticas e as demais ocorrências de ociosidade, considerando todos os equipamentos estudados.

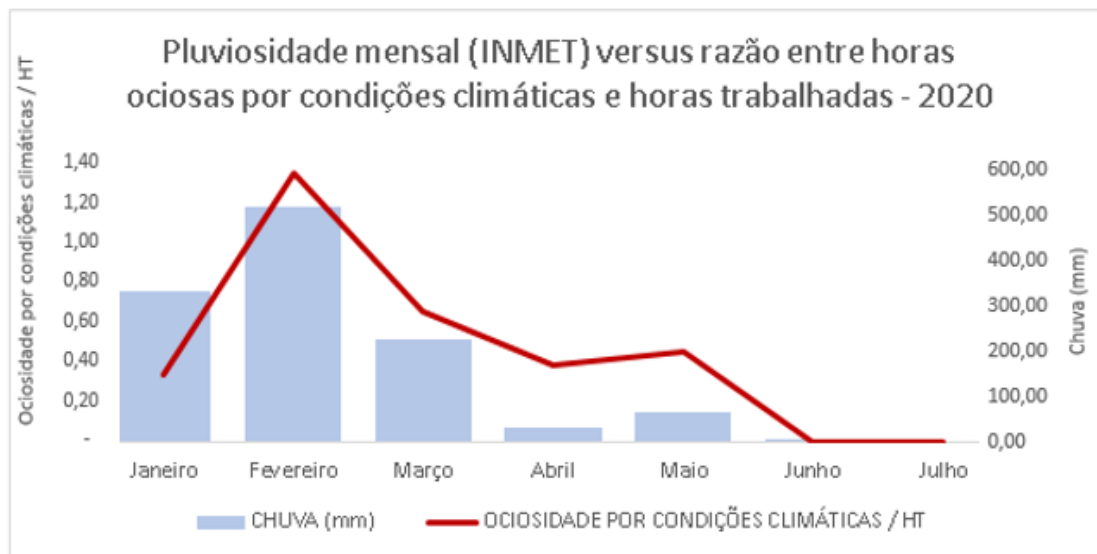
Figura 12: Horas ociosas totais ao longo dos meses.



As horas ociosas tem impacto direto no fator de utilização e, conseqüentemente, impacta no rendimento operacional dos equipamentos. É notório, a partir do gráfico, que em fevereiro a quantidade de horas ociosas decorrentes de condições climáticas foi maior do que nos demais meses, representando 58,71% do total, ou seja, somando 12.775 horas, aproximadamente.

Comparando a variação de pluviosidade mensal e a razão entre horas ociosas por condições climáticas e horas trabalhadas, plotou-se o gráfico mostrado na Figura 13, onde percebe-se que as duas variáveis são diretamente proporcionais, mostrando que quanto maior o índice de chuvas na região, maior a razão entre horas ociosas por condições climáticas e horas trabalhadas.

Figura 13: Gráfico de pluviosidade mensal versus razão entre horas ociosas por condições climáticas e horas trabalhadas.



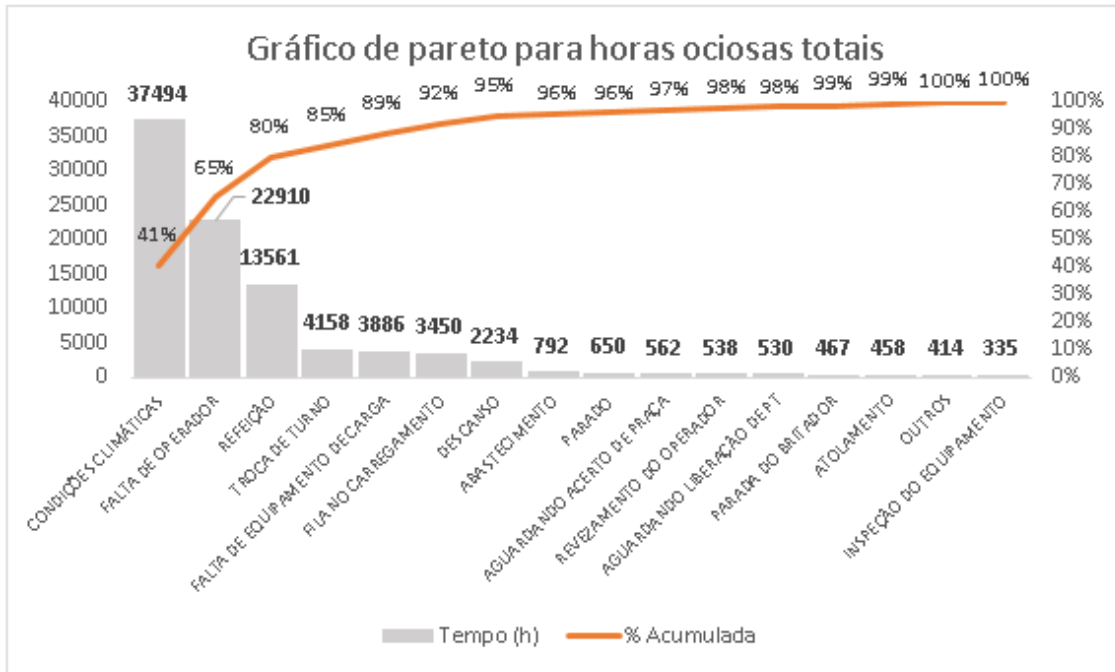
Fonte: Adaptado de INMET (2020).

Analisando o gráfico é possível notar que em fevereiro houve o maior índice de chuvas, sendo que o mesmo aconteceu entre a razão de horas ociosas por condições climáticas horas trabalhadas. Esse fato se dá pelo alto índice pluviométrico na região da cidade de Tapira, que registrou média de 333 mm/mês no primeiro trimestre de 2020.

Para validar essa proporcionalidade, foi calculado o índice de correlação de Pearson, que segundo Graça Martins (2014), é uma medida da direção e grau com que duas variáveis, de caráter quantitativo, que se associam linearmente, sendo que esse índice podendo variar de -1 a 1. No caso da análise em questão, o coeficiente de correlação foi 0,84, concluindo existir uma associação linear positiva entre as duas variáveis, isto é, quando uma aumenta, existe a tendência do valor da outra variável também aumentar.

Analisando as horas ociosas totais dos equipamentos estudados, foi feito um gráfico de Pareto mostrando o percentual que cada uma das principais ocorrências de ociosidade representa para as horas totais ociosas. Esse gráfico é apresentado na Figura 14.

Figura 14: Gráfico de Pareto para horas ociosas totais.



A maior ocorrência de ociosidade para as frotas estudadas aconteceu devido às condições climáticas, somando 41% do total, sendo essa uma ocorrência onde não se tem muito controle. No entanto, deve-se planejar de acordo com as previsões meteorológicas para que essas paralisações não ocorram de forma inesperada. Em segundo lugar houve como causa a falta de operador como maior agravante para às horas ociosas totais, somando 24% do total de horas.

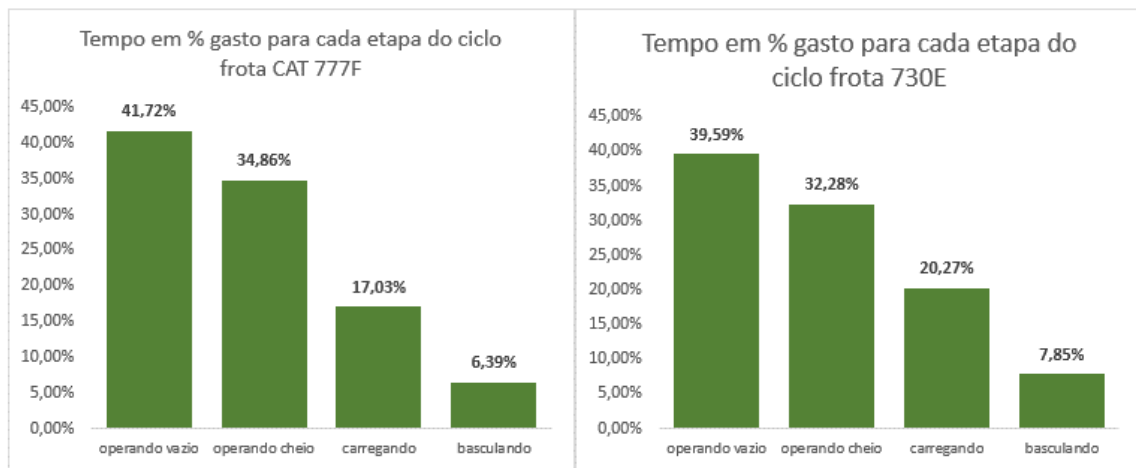
Dessa forma, conclui-se que há necessidade de uma melhor alocação dos operadores dos equipamentos ou a contratação de mais desses, de acordo com o planejamento de produção da empresa, para que não ocorra um valor alto de ocorrências por esse motivo. É imprescindível que ocorram paradas para refeição, troca de turno e descanso, que juntas somam 23% do total, no entanto um trabalho de revezamento poderá minimizar este impacto. Outra sugestão é que os revezamentos e trocas de turnos sejam feitas no local onde encontra-se o equipamento pois, dessa forma, evita-se deslocamentos apenas para esta finalidade.

No caso das ocorrências por falta de equipamento de carga e fila no carregamento, que correspondem a 7%, a falta de sincronismo entre as operações unitárias de carregamento e transporte na mina leva os equipamentos de transporte a

ficarem aguardando para serem carregados, gerando uma ociosidade muitas vezes desnecessária.

As horas trabalhadas, que correspondem as horas produtivas do ciclo, foram plotadas em um gráfico e analisadas para os equipamentos de transporte, como é mostrado na Figura 15. A partir do gráfico é possível observar a porcentagem de tempo gasto para cada uma das etapas do ciclo, que é composto por tempo operando cheio, operando vazio, carregado e basculando.

Figura 15: Tempo gasto em % para cada etapa do ciclo para as frotas de transporte CAT 777F e 730E.



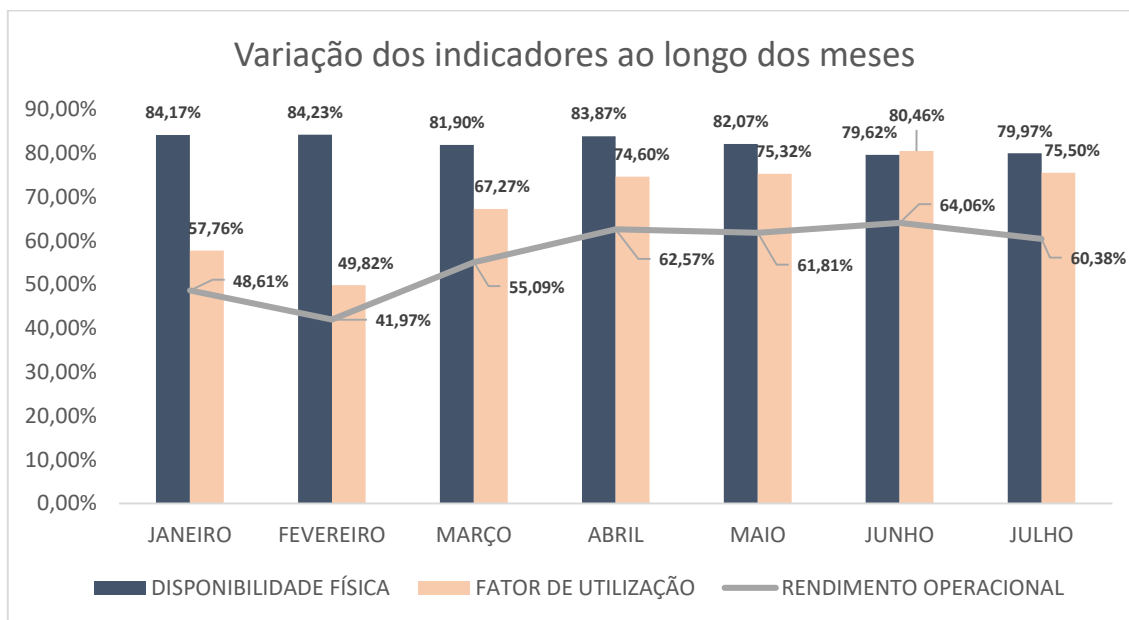
Analisando os gráficos, foi possível observar que ambos se comportam de maneira semelhante, tendo como maior tempo gasto operando vazio, seguido de operando cheio, carregando e finalmente basculando.

O maior tempo gasto, para ambas as frotas, foi operando vazio. Isso se deve ao fato de que a distância média que os caminhões percorrem vazios são maiores que a distância percorrida quando cheios, ou seja, esses percorrem caminhos diferentes quando estão vazios e cheios, mostrando uma coerência para um menor desgaste dos caminhões, pois quando o mesmo está cheio, se desgasta mais, impactando na manutenção que os mesmos passariam. Analisando percentualmente, a frota 730E passa mais tempo carregando que a frota CAT 777F, fato que pode ser explicado devido a capacidade nominal do primeiro ser praticamente o dobro da capacidade nominal do segundo, considerando que ambas frotas são carregadas pelas mesmas carregadeiras.

## 4.2. Cálculo do rendimento operacional

O rendimento operacional, é um indicador que sofre influência direta da disponibilidade física e do fator de utilização, sendo calculado através do produto dos mesmos. A Figura 16, apresenta um gráfico da variação da disponibilidade física, do fator de utilização e do rendimento operacional ao longo dos meses para os equipamentos estudados.

Figura 16: Variação dos indicadores ao longo dos meses.



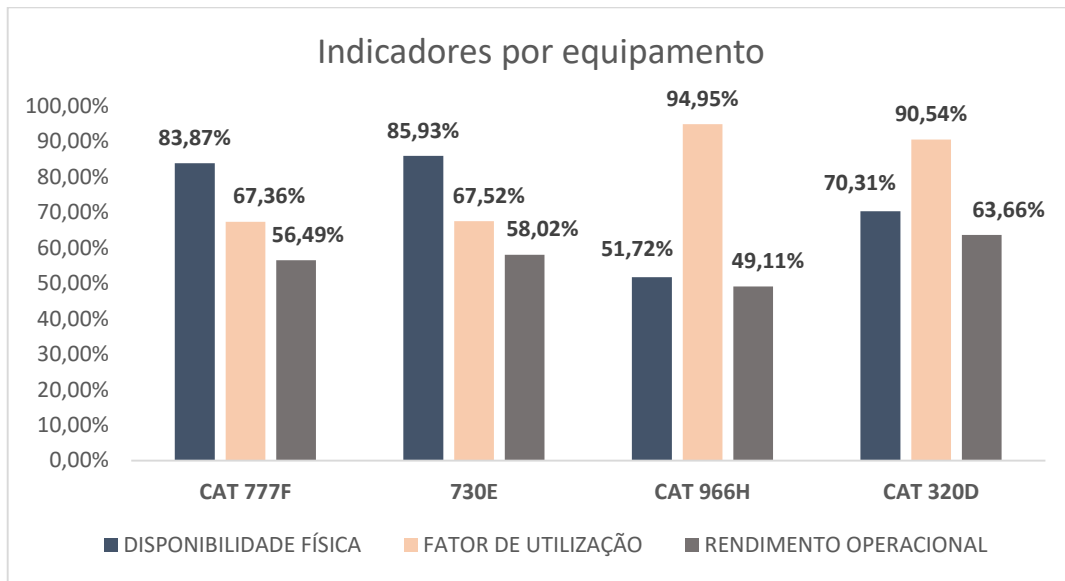
Ao realizar o comparativo do gráfico da Figura 16 ao mostrado na Figura 11, é possível observar que quanto menor as horas de manutenção totais, maior a disponibilidade física. Por exemplo, no mês de janeiro, apresentou 1685,76 horas de manutenção ao todo e 84,17% de disponibilidade física, enquanto nos meses de mais horas de manutenção, a disponibilidade foi menor, como no caso do mês de março, onde as paradas para manutenção ao total chegaram a 2401 horas e a disponibilidade foi de 81,9%.

A análise feita da variação do fator de utilização comparada a variação de horas ociosas mostrado na Figura 2, mostrou que quanto mais horas ociosas registradas, menor o fator de utilização no mesmo período, a exemplo o mês de fevereiro, onde

ocorreram 21758,07 horas ociosas e um fator de utilização de 49,82%. Já em junho, foram registradas 4577,27 horas de ociosidade, o menor valor no período estudado, e o fator de utilização foi de 80,46%.

Os indicadores de produção por equipamento considerando todos os meses estudados, foi mostrado na Figura 17.

Figura 17: Indicadores de disponibilidade física, fator de utilização e rendimento operacional por equipamento.



A partir da análise do gráfico percebe-se que a frota 730E, de transporte, possui maior disponibilidade física, com 85,93%, enquanto que a frota CAT 966H, de carregamento possui o menor valor para esse indicador, com percentual de 51,72.

Já para o indicador de fator de utilização, nota-se que a frota de carregamento CAT 966H, possui o maior percentual do indicador, 94,95%, mostrando que essa tem registrado o menor valor de horas ociosas, enquanto que a frota CAT 777F de transporte possui o menor fator de utilização, totalizando 67,36%. A frota 730E, de transporte, possui maior disponibilidade física, registrando 85,93%, ou seja, esse equipamento passou menos horas de manutenção. Enquanto que a frota CAT 966H, de carregamento possui o menor valor para esse indicador, com percentual de 51,72%, sendo esse o equipamento que passa por mais horas de manutenção.



### 4.3. Cálculo da produtividade horária efetiva e nominal

Para o cálculo da produtividade nominal dos equipamentos de transporte, primeiro determinou-se a distância média de transporte (DMT) para os mesmos, chegando no resultado de 5,6 km para a frota CAT 777F e 5,5 km para a frota 730E.

Para o cálculo do tempo total de ciclo da frota de transporte, primeiramente foi calculado o tempo médio de viagem, que leva em conta as velocidades médias (vazio e cheio), e a DMT de cada um dos modelos, através da Equação 4. O tempo de ciclo dos equipamentos de transporte é o somatório dos tempos de: viagem, carregamento, basculamento e manobra, como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1: Tempo de ciclo para equipamentos de transporte

<b>Componentes do ciclo</b>	<b>Unidade</b>	<b>Frota 730E</b>	<b>Frota CAT 777F</b>
Tempo total de viagem	Minutos	19,61	18,24
Tempo de carregamento	Minutos	3,53	4,53
Tempo de basculamento	Minutos	1,33	1,80
Tempo de Manobra	Minutos	0,57	1,18
<b>Tempo Total do ciclo</b>	<b>Minutos</b>	<b>25,04</b>	<b>25,75</b>

Após o cálculo do tempo de ciclo, que é 25,04 minutos para a frota 730E e 25,75 minutos para a frota CAT 777F, foi possível calcular o número de viagens que cada um faz por hora, dividindo uma hora (60 minutos) pelo tempo total de ciclo.

Para determinar a produtividade nominal de cada equipamento, utilizou-se como capacidade nominal a melhor ocorrência de produção (benchmark) para cada um dos modelos de frota, sendo esses valores validados pela teoria de Smirnov, que segundo Leotti, Birck e Riboldi (2013), verifica se a distribuição de um conjunto de dados adere à Distribuição Normal. Multiplicando-se esse valor de capacidade nominal pelo número de viagens por hora, chegou-se à produtividade efetiva dos equipamentos de transporte.

A produtividade horária efetiva foi calculada através da razão da massa movimentada pelo equipamento em questão, dividido pela soma dos tempos de todos ciclos. Todos os parâmetros são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2: Cálculo da taxa horária nominal e efetiva para os equipamentos de transporte

<b>Dados</b>	<b>Unidade</b>	<b>Frota 730E</b>	<b>Frota CAT 777F</b>
Nº de viagens por hora	-	2,33	2,4
Capacidade nominal do caminhão (benchmark)	t	230	116
Produtividade horária nominal	t/h	535,83	277,9
Massa movimentada	t	15.376.538,00	16.580.880,50
Soma dos tempos de todos ciclos	h	29.421,574	60.310,82
<b>Produtividade horária efetiva</b>	<b>t/h</b>	<b>522,6</b>	<b>274,9</b>

Para a frota de carregamento, o cálculo da taxa horária nominal foi feito coletando a melhor ocorrência de produtividade horária para cada frota, sendo esse valor também validado pela teoria de *Smirnov*, para que o mesmo seja representativo do universo amostral. Já a produtividade efetiva foi feita de forma semelhante a frota de transporte, dividindo a massa movimentada por cada um dos modelos de equipamentos no período de tempo estudado, pela soma do tempo total de todos os ciclos, em horas. Os dados para os equipamentos de carga são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3: Cálculo da produtividade nominal e efetiva para os equipamentos de carga

<b>Dados</b>	<b>Unidade</b>	<b>Frota CAT 966H</b>	<b>Frota CAT 320D</b>
<b>Produtividade horária nominal (benchmark)</b>	<b>t/h</b>	<b>622,95</b>	<b>1003,51</b>
Massa movimentada	t	4.446	184.593,60
Soma dos tempos de todos ciclos	h	15,166	385,381
<b>Produtividade horária efetiva</b>	<b>t/h</b>	<b>293,16</b>	<b>478,99</b>

#### 4.4. Cálculo do OEE

O OEE consiste em um indicador muito utilizado na indústria para avaliar a eficiência global de um ativo. Primeiramente foi feito o cálculo da eficiência de produção, de acordo com a Equação 5. O cálculo da eficiência de produção e os parâmetros que compuseram a fórmula do OEE são mostrados na Tabela 4.

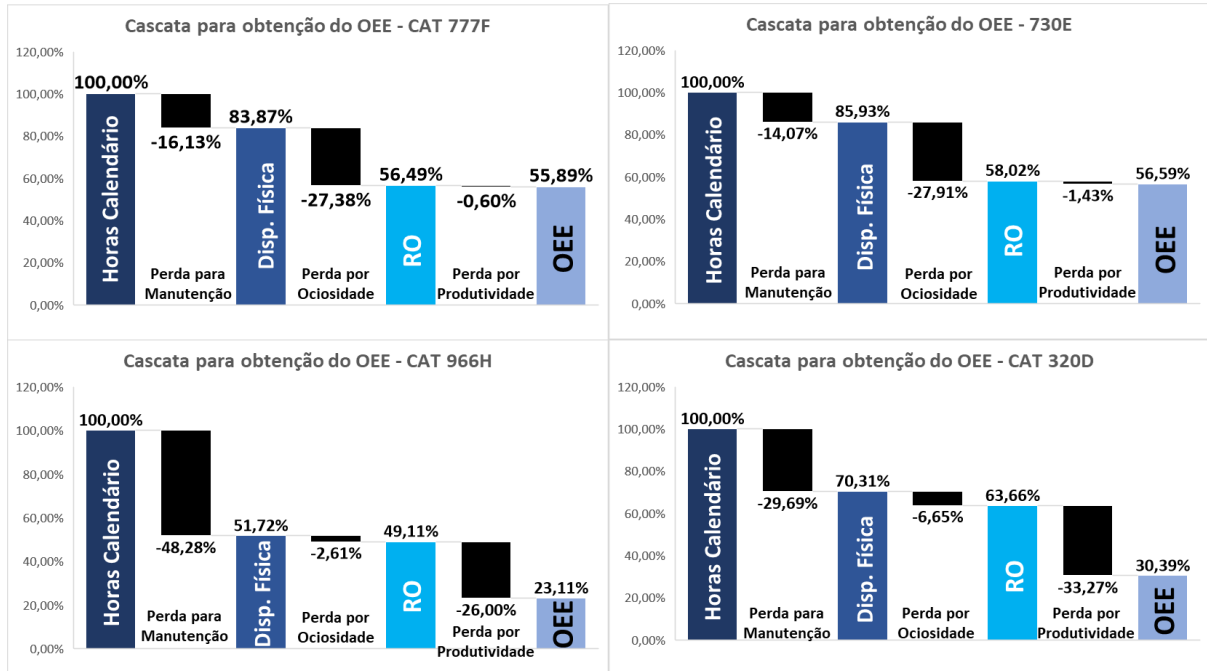
Tabela 4: Cálculo do OEE para os equipamentos estudados

Dados	Unidade	Frota de Transporte		Frota de Carregamento	
		Frota CAT 730E	Frota CAT 777F	Frota CAT 966H	Frota CAT 320D
Produtividade horária nominal	t/h	535,83	277,90	622,95	1003,51
Produtividade horária efetiva	t/h	522,6	274,9	293,16	478,99
<b>Eficiência de Produção</b>	<b>%</b>	<b>97,54</b>	<b>98,93</b>	<b>47,06</b>	<b>47,73</b>
Rendimento Operacional	%	58,02	56,49	49,11	63,66
<b>OEE</b>	<b>%</b>	<b>56,59</b>	<b>55,89</b>	<b>23,11</b>	<b>30,39</b>

De forma geral, nota-se os valores baixos para essa variável, refletindo os valores pouco satisfatórios para os rendimentos operacionais dos equipamentos, assim como para os equipamentos de carga, que possuem baixa eficiência de produção.

A Figura 18, apresenta um gráfico para cada equipamento, mostrando de maneira gradativa, como se chegou no resultado de OEE.

Figura 18: Parâmetros que compõem o resultado do OEE.



A partir da análise dos dados demonstrados no gráfico é possível observar que, para os equipamentos de transporte, CAT 777F e 730E, houve um baixo percentual de perda por manutenção, resultando em uma disponibilidade física maior. Também se observa que os mesmos apresentaram baixa perda por produtividade, ou seja, tiveram uma eficiência de produção alta, impactando pouco no resultado final de OEE. Já para os equipamentos de carga, CAT 966H e CAT 320D, a perda por manutenção e produtividade se mostrou alta, diminuindo bastante o valor da disponibilidade física e do OEE, respectivamente.

A perda por produtividade pode ser reduzida, no caso dos equipamentos de carga, se os mesmos trabalharem próximos de sua capacidade nominal, enchendo suas conchas para carregarem os caminhões. Para a perda percentual por ociosidade, os equipamentos de transporte, CAT 777F e 730E, se mostram mais ociosos se comparados aos equipamentos de carga, impactando mais no fator de utilização, e conseqüentemente, no rendimento operacional, como mostrado no gráfico.

#### 4.5. Dimensionamento de frota por indicadores operacionais

Para se fazer o cálculo do número de equipamentos, foi utilizada a Equação 8. As horas totais ou horas calendário foram as horas de 7 meses, no caso, 5088 horas. Os parâmetros que compõem a fórmula para cada um dos equipamentos são mostrados na Tabela 5. Como se trata de número de equipamentos, os resultados foram arredondados para o número inteiro mais próximo.

Dados	Unidade	Frota de Transporte		Frota de Carregamento	
		Frota CAT 730E	Frota CAT 777F	Frota CAT 966H	Frota CAT 320D
Horas calendário	h	5088	5088	5088	5088
Rendimento Operacional Horas	%	58,02	56,49	49,11	63,66
Trabalhadas Efetivas	h	2988,18	2871,67	2011,29	3466,96
Rendimento Operacional	%	58,02	56,49	49,11	63,66
Massa planejada		15.376.538	16.580.880	16.580.880	16.580.880
Quantidade de equipamentos calculada	-	9,85	21,00	28,12	9,98
<b>Quantidade de equipamentos arredondada</b>	-	<b>10</b>	<b>21</b>	<b>28</b>	<b>10</b>

Tabela 5: Dimensionamento da frota de carregamento e transporte

O número de equipamentos calculada para as frotas de transporte e a quantidade utilizada pela empresa na prática, estão mostrados na Tabela 6.

Tabela 6: Comparativo entre número de equipamentos de transporte calculado e utilizado na prática da empresa

<b>Modelo da frota</b>	<b>Quantidade calculada</b>	<b>Quantidade utilizada</b>
730E	10	12
CAT 777F	21	24

Tanto para a frota 730E quanto para a frota CAT 777F, observou-se que a quantidade de equipamentos calculada se aproxima bastante da quantidade utilizada na prática. A diferença de 2 e 3 equipamentos para a frota 730E e CAT777F, respectivamente, mostra que há uma pequena variação dos indicadores operacionais de produção e da eficiência de produção ao longo dos meses em relação aos calculados durante o tempo analisado pelo trabalho. A pequena folga no número de equipamentos calculado e utilizado na prática para ambos equipamentos pode ser importante nos meses em que os indicadores estejam em baixa, caso ocorra essas baixas. Caso a empresa consiga melhorar ainda mais esses parâmetros praticados ao longo dos meses, cada vez menos equipamentos seriam necessários para movimentar a massa planejada, diminuindo custos e, conseqüentemente, aumentando o lucro da mesma.

Para os resultados obtidos para as frotas de carregamento, apresentados na Tabela 8, é possível observar uma considerável diferença na quantidade de equipamentos necessária para movimentar a mesma massa.

Tabela 7: Comparativo entre quantidade de equipamentos calculada para as frotas de carregamento

<b>Modelo da frota</b>	<b>Quantidade de equipamentos calculada</b>	<b>Rendimento Operacional</b>	<b>Produtividade horária efetiva</b>
CAT 966H	28	49,11%	293,16 t/h

CAT 320D	10	63,66%	478,99 t/h
----------	----	--------	------------

---

Para a frota CAT 966H, a quantidade de equipamentos necessária calculada foi de 28, enquanto que para a frota CAT 320D, a quantidade foi de 10. Essa diferença pode ser explicada pela diferença nos indicadores das duas frotas.

Enquanto a frota CAT 966H apresenta 49,11% de rendimento operacional e produtividade horária efetiva de 293,16 t/h, a frota CAT 320D apresenta 63,66% de rendimento operacional e 478,99 t/h de produtividade horária efetiva. Dessa forma, conclui-se que com o aumento desses indicadores, menos equipamentos são necessários para movimentar a mesma massa, impactando positivamente nos resultados financeiros, pois reduziria os custos gerais de equipamentos.

## 5. CONCLUSÃO

No presente trabalho foi realizado o dimensionamento de duas frotas de transporte e duas frotas de carregamento, usando como base indicadores operacionais de produção, fornecidos pelo sistema de despacho *EasyMine*, da Instale Tecnologia. O dimensionamento de frota por indicadores de produção trouxe resultados coerentes com a realidade operacional, sendo que quanto maior a aderência dos indicadores de produção estimados com os praticados, maior será a representatividade da estimativa com a realidade da operação em questão.

Ao comparar o indicador disponibilidade física dos equipamentos com as horas gastas em manutenções, foi possível observar que existe um alto índice de manutenções corretivas se comparadas ao número de manutenções preventivas, o que impacta diretamente na disponibilidade física das máquinas. Dessa forma, se faz necessário investir em mais manutenções preventivas e substituição de equipamentos pouco operantes, visando melhorar esse indicador.

Através da análise do fator de utilização dos equipamentos estudados e comparação desses valores com as horas ociosas apresentadas ao longo dos meses de estudo, evidencia-se a necessidade de melhor controle das ocorrências de horas ociosas, já que os mesmos impactam diretamente no indicador de fator de utilização, que de forma geral se apresentou baixo nos meses estudados.

Uma melhor alocação dos operadores dos equipamentos ou a contratação de mais destes pode ser interessante para diminuir as ocorrências por falta de operador. O tempo de refeição, troca de turno e descanso deve ser melhor avaliado e definido a fim de que os equipamentos não fiquem excessivamente ociosos durante esse período. Outra medida que poderia diminuir as horas ociosas seria a melhora no sincronismo entre as operações de carregamento e transporte, diminuindo as ocorrências por falta de equipamento de carga e fila no carregamento.

A quantidade de equipamentos calculada para movimentar a massa planejada para cada um dos equipamentos reflete os indicadores calculados ao longo dos meses, mostrando o quão influentes os indicadores básicos de produção são nesse cálculo. Quando observados para a frota de transporte, é possível concluir que há uma certa aderência dos indicadores calculados e os praticados, refletindo no número de equipamentos calculados próximos ao utilizado na prática. Quando analisada a



frota de carregamento, nota-se a diferença substancial entre o número de equipamentos necessários para a frota CAT 966H e para a frota CAT 320D. Isso pode ser explicado pelas diferenças entre os indicadores rendimento operacional e produtividade horária efetiva, que refletiram no número de equipamentos calculado.

## 6. REFERÊNCIAS

AMARAL, M. **Modelos matemáticos e heurísticas para auxílio ao planejamento de operações de lavra em minas a céu aberto.** (Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas), Universidade Federal de Minas Gerais., Belo Horizonte 2008.

BAZZAZI A. A., OSANLOO M., OHAMMADI H. S., **Loading-haulage equipment selection in open pit mines based on fuzzy-TOPSIS method.** Artigo em Gospodarka Surowcami Mineralnymi, 2008.

BORGES, T. C. **Análise Dos Custos Operacionais De Produção No Dimensionamento De Frotas De Carregamento E Transporte Em Mineração.** (Dissertação de Mestrado do curso de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro preto 2013.

BOTELHO, A. H. **Influencia Da Operação De Desmonte De Rochas No Carregamento De Material Fragmentado.** (Dissertação de Mestrado do curso de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Materiais e Metalúrgica), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

CATERPILLAR, **Performance Handbook.** 44<sup>a</sup> edition, Peoria Illinois, USA. 2014

COSTA, F. P.; SOUZA, M. J. F.; PINTO, L. R. **Um modelo de alocação dinâmica de caminhões visando ao atendimento de metas de produção e qualidade.** Revista Escola de Minas, Ouro Preto, 2005.

CURI, A. **Lavra de minas.** Oficina de Textos, São Paulo 2017.

COUTINHO, H. L. **Melhoria Contínua Aplicada Para Carregamento E Transporte Na Operação De Mina A Céu Aberto.** (Dissertação de Mestrado do curso de Pós-Graduação em Engenharia Mineral do Departamento de Engenharia de Minas), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

DIAS, T.F.; **Avaliação de indicadores operacionais: Estudo de caso de uma empresa do setor Ferroviário** (EPD/UFJF, Graduação, Engenharia de Produção, 2008) Monografia - Universidade Federal de Juiz de Fora, Departamento de Engenharia de Produção 2008.

GRAÇA M. E. **Coefficiente de correlação amostral** (2014), Revista de Ciência Elementar, volume 2(02):0069

INMET, **Instituto Nacional de Meteorologia.** BDMEP - Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa. Disponível em:<<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em: 11/08/2021.

LAGES, A. R.; Borges, V. **Estudo Preliminar da influência do porte de veículos de carregamento e transporte nos custos operacionais de minas a céu aberto**, 2018.

LEOTTI, V.B., BIRK, A. R., RIBOLDI, J. **Comparação dos testes de aderência à normalidade kolmogorov- smirnov, anderson-darling, cramer-von mises e shapiro-wilk por simulação**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

MELO, S. O. **Estudo De Tempos De Ciclo De Carregamento E Transporte De Minério Em Uma Mina A Céu Aberto**. (Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia de Minas), Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá, 2020.

RODRIGUES, L. F. **Análise comparativa de metodologias utilizadas no despacho de caminhões em minas a céu aberto**. (Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Minas Gerais. 2006.

SILVA, L. **Estudo de variáveis para o dimensionamento do número ótimo de caminhões em um ciclo operacional**. (Relatório Final de Iniciação Científica – PIBIC.) Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá, 2019.