



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS  
GERAIS – UNIDADE ARAXÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS  
MESTRADO PROFISSIONAL**

**METODOLOGIA PARA IMPLEMENTAÇÃO DE CAMINHÃO  
AUTÔNOMO EM UMA MINA A CÉU ABERTO**

**MAYARA BRUNO DA CUNHA**

**ARAXÁ – MINAS GERAIS  
2024**

2024  
MAYARA BRUNO DA CUNHA

**METODOLOGIA PARA IMPLEMENTAÇÃO DE CAMINHÃO  
AUTÔNOMO EM UMA MINA A CÉU ABERTO**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG, Campus Araxá como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Marcélio Prado Fontes.

Linha de pesquisa: Geologia de Engenharia na Mineração.

ARAXÁ – MINAS GERAIS

Cunha, Mayara Bruno da  
C972m Metodologia para implementação de caminhão autônomo em uma mina a céu aberto / Mayara Bruno da Cunha. – 2024.  
64 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Marcélio Prado Fontes.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Araxá, 2024.  
Bibliografia.

1. Minas e Mineração – Teses. 2. Minas a céu aberto – Teses. 3. Tecnologia – Teses. 4. Transporte autônomo – Teses. I. Fontes, Marcélio Prado. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. IV. Título.

CDU 622.2

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus pela sabedoria nos momentos difíceis e a fé para não desistir. Consagre ao Senhor tudo o que você faz, e os seus planos serão bem-sucedidos.

Gostaria de expressar meu profundo agradecimento a todas as pessoas e entidades que tornaram possível a realização deste projeto. Em primeiro lugar, agradeço ao Fabrício, minha mãe, minha avó e meus irmãos, pelo apoio incondicional e pelo incentivo constante ao longo dessa jornada.

Aos colegas de projeto e empresa, meu sincero agradecimento pela colaboração e pelo trabalho em equipe, que foram fundamentais para o sucesso deste trabalho. Cada contribuição foi valiosa e essencial para a construção deste projeto.

À mineradora e à empresa fabricante do caminhão, expresso minha gratidão pela confiança e entusiasmo demonstrados durante todo o processo de desenvolvimento do projeto. Suas parcerias foram fundamentais para a realização deste trabalho.

Ao meu orientador Marcélio, e a toda a banca examinadora, agradeço pelas contribuições, orientações e críticas construtivas ao meu trabalho. Seus insights foram fundamentais para o aprimoramento deste projeto.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para este trabalho.

## RESUMO

Para acompanhar o crescimento do setor, a transformação e os desafios de mercado que estão surgindo, a mineração vem adotando cada vez mais a automação. Esta alternativa tem se mostrado uma boa opção para maior segurança e produtividade na operação unitária de transporte. Embora os caminhões autônomos já estejam em operação em algumas minas no Brasil, a aquisição de uma frota autônoma ainda requer grande investimento, para isso uma decisão de aquisição requer previamente uma validação operacional. Esta validação pode ocorrer através de testes em campo, de forma a criar evidências técnicas para uma tomada de decisão segura acerca da mudança, analisando a viabilidade de aplicação da tecnologia ou produto na realidade operacional de cada mina. Este trabalho teve como foco a realização roteirizada e padronizada de teste de caminhões autônomos em uma mina a céu aberto, mapeando e implementando parâmetros de monitoramento e indicadores de performance, bem como a infraestrutura necessária para execução do teste. Através do direcionamento do fluxograma de processos gerado foi possível mapear os indicadores necessários para o teste, eliminando oito paradas operacionais desnecessárias e a criação de oito novos indicadores cruciais para medir o desempenho do AHS (*Autonomous Haulage System*) Foi possível identificar que a tecnologia apresentada ainda precisa de melhorias nas ferramentas de coleta de dados, para que estes possam munir o estudo de viabilidade econômica de um AHS. Desenvolveu-se importantes reflexões em relação aos desafios operacionais e de infraestrutura envolvidos na implantação de uma área autônoma, sendo a comunicação de rede um ponto crucial. O projeto também trouxe ganhos em relação a maturidade da equipe em relação ao transporte autônomo.

**Palavras-chave:** Transporte autônomo, Teste de Autônomo, Fluxo de processos, Indicadores de performance.

## **ABSTRACT**

To keep pace with the sector's growth, transformation, and emerging market challenges, mining has been increasingly adopting automation. This alternative has proven to be a good option for greater safety and productivity in the unit operation of transportation. Although autonomous trucks are already in operation in some mines in Brazil, acquiring an autonomous fleet still requires a significant investment, making an acquisition decision require prior operational validation. This validation can occur through field tests, creating technical evidence for a safe decision-making process regarding the change, analyzing the feasibility of applying the technology or product to the operational reality of each mine. This work focused on the scripted and standardized execution of autonomous truck tests in an open-pit mine, mapping and implementing monitoring parameters and performance indicators, as well as the necessary infrastructure for test execution. Through the direction of the generated process flowchart, it was possible to map the necessary indicators for the test, eliminating eight unnecessary operational stops and creating eight new crucial indicators to measure the performance of the AHS (Autonomous Haulage System). It was possible to identify that the presented technology still needs improvements in data collection tools so that they can support the economic feasibility study of an AHS. Important reflections were developed regarding the operational and infrastructure challenges involved in implementing an autonomous area, with network communication being a crucial point. The project also brought gains in the team's maturity regarding autonomous transportation.

**Keywords:** Autonomous Transport, Autonomous Test, Process Flow, Performance Indicators.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ciclo de Transporte .....	8
Figura 2 – Árvore de Horas .....	11
Figura 3 – Etapas de análise de processo .....	16
Figura 4 – Níveis de automação .....	19
Figura 5 – Visão geral do sistema autônomo. ....	23
Figura 6 – Fluxograma de atividades .....	29
Figura 7 – Fluxograma de processo para criação de teste de validação .....	29
Figura 8 – Divisão de dados de ciclo de transporte.....	32
Figura 9 – Integridade dos dados.....	33
Figura 10 – Edições de ciclo de transporte.....	34
Figura 11 – Exemplo de distribuição mensal de DF do caminhão .....	43
Figura 12 – Imagem área da AOZ de teste .....	50
Figura 13 – Imagem de <i>access point</i> da rede <i>wi-fi</i> da mina .....	51
Figura 14 – Imagem da antena instalada .....	53
Figura 15 – Mapeamento da qualidade da rede na AOZ de teste.....	54
Figura 16 – Placa de sinalização da AOZ de teste .....	55
Figura 17 – Componentes do caminhão autônomo .....	56
Figura 18 – Análise do fluxograma de processo após o teste.....	58

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela I – Análise de quartis. ....	33
Tabela II – Comparativo de paradas operacionais.....	36
Tabela III – Impactos nas paradas operacionais.....	41
Tabela IV – Levantamento de horas de parada ano dos caminhões tripulados.....	42
Tabela V – Tabela consolidada de indicadores. ....	48
Tabela VI – Tabela de resultados do teste.....	57

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- AHS – (*Autonomous Haulage System*) – Sistema de transporte autônomo
- AOZ – (*Autonomous Operation Zone*) – Área de operação autônoma
- CM – Carga média
- DF – Disponibilidade física
- DMT – Distância média de transporte
- GMG – (*Global Mining Guidelines*) – Guia Global de Mineração
- HC – Horas calendário
- HD – Horas disponíveis
- HI – Horas Inativas
- HM – Horas de manutenção
- HMC – Horas de manutenção corretiva
- HMP – Horas de manutenção preventiva
- HO – Horas ociosas
- HOG – Horas ociosas gerenciáveis
- HONG – Horas ociosas não gerenciáveis
- HP – Horas programadas
- HT – Horas trabalhadas
- HTNP – Horas trabalhadas não produtivas
- HTP – Horas trabalhadas produtivas
- IA – Inteligência artificial
- IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração
- ISO – (*International Organization for Standardization*) – Organização Internacional de Normalização
- KPI – (*Key Performance Indicator*) Indicador Chave de Desempenho
- LTE – *Long term Evolution* – padrão de rede comunicação móvel
- PD – Produção
- PR – Produtividade
- PH – Produtividade horária
- REM - Relação estéril/minério
- TB – Tempo de basculamento
- TC – Tempo de carregamento

TFB – Tempo de fila para bascular

TFC – Tempo de fila para carregar

TMB – Tempo de manobra para bascular

TMC – Tempo de manobra para carregar

UF – Utilização física

VM – Velocidade média

## SUMÁRIO

<b>1 - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 - Escolha do Assunto.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 - Definição e Delimitação do Problema.....</b>	<b>2</b>
<b>1.3 - Contextualização.....</b>	<b>2</b>
<b>1.4 - Problematização .....</b>	<b>3</b>
<b>1.5 - Justificativa .....</b>	<b>3</b>
<b>1.6 - Hipótese Norteadora .....</b>	<b>3</b>
<b>1.7 - Objetivos.....</b>	<b>4</b>
<b>2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>4</b>
<b>2.1 - Exploração de mina a céu aberto .....</b>	<b>4</b>
<b>2.2 - Métodos de lavra a céu aberto.....</b>	<b>5</b>
<b>2.3 - Operações Unitárias .....</b>	<b>6</b>
<i>2.3.1 Carregamento e transporte .....</i>	<i>6</i>
<b>2.4 – Dimensionamento de Produção .....</b>	<b>9</b>
<i>2.4.1 Estratificação das Horas Calendário .....</i>	<i>10</i>
<i>2.4.2 Disponibilidade Física .....</i>	<i>12</i>
<i>2.4.3 Utilização Física .....</i>	<i>13</i>
<i>2.4.4 Produtividade de Transporte.....</i>	<i>14</i>
<i>2.4.5 Dimensionamento de Produção .....</i>	<i>14</i>
<b>2.5 – Fluxograma de processos .....</b>	<b>15</b>
<b>2.6 – Automação.....</b>	<b>17</b>

2.6.1	<i>Automação na Mineração</i>	17
2.6.2	<i>Implantação de sistema autônomo</i>	20
2.6.3	<i>Requisitos para implantação</i>	21
<b>2.7</b>	<b>Infraestrutura de mina</b>	<b>24</b>
2.7.1	<i>Zona de Operação Autônoma (AOZ)</i>	24
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA DE PESQUISA</b>	<b>24</b>
<b>3.1</b>	<b>Natureza e classificação da pesquisa</b>	<b>24</b>
<b>3.2</b>	<b>Procedimentos metodológicos</b>	<b>25</b>
3.2.1	<i>Planejamento do projeto</i>	25
3.2.2	<i>Definição do objetivo e prazo do teste</i>	25
3.2.3	<i>Estudo para definição dos indicadores a serem monitorados</i>	26
3.2.4	<i>Definição de uma ferramenta</i>	26
3.2.4.1	<i>Levantamento de dados</i>	27
3.2.4.2	<i>Tratamento dos dados</i>	27
3.2.5	<i>Definição de Premissas</i>	28
3.2.6	<i>Implantação de AOZ de teste</i>	28
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>29</b>
<b>4.1</b>	<b>Fluxograma de processos</b>	<b>29</b>
<b>4.2</b>	<b>Criação do Projeto</b>	<b>30</b>
<b>4.3</b>	<b>Mapeamento de parâmetros e indicadores</b>	<b>32</b>
4.3.1	<i>Garantia da qualidade da base de dados da frota tripulada</i>	32
4.3.2	<i>Utilização Física</i>	35
4.3.3	<i>Disponibilidade Física</i>	43
4.3.4	<i>Indicadores de Produtividade</i>	44
4.3.5	<i>Indicadores de Segurança</i>	45
4.3.6	<i>Indicadores específicos do teste</i>	46
<b>4.4</b>	<b>Consolidado de indicadores</b>	<b>47</b>
<b>4.4</b>	<b>Implantação de AOZ de teste</b>	<b>50</b>

4.4.1 Definição da área de teste.....	50
4.4.2 Infraestrutura de rede .....	51
4.4.3 Infraestrutura de mina e sinalização.....	54
4.4.4 Requisitos de segurança.....	55
<b>4.5 – Execução de Teste .....</b>	<b>56</b>
<b>4.6 – Ganhos levantados com o projeto.....</b>	<b>59</b>
<b>5 – CONCLUSÕES.....</b>	<b>60</b>
<b>6 – TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>61</b>
<b>7 - REFERÊNCIAS .....</b>	<b>62</b>

# 1 - INTRODUÇÃO

## 1.1 - Escolha do Assunto

O desenvolvimento de tecnologias foi um fator determinante para o crescimento do setor da mineração nos últimos anos. Segundo o IBRAM (2022) o setor de mineração faturou no ano de 2022 um valor de R\$ 250 bilhões, alcançando um saldo comercial de US\$ 24,9 bilhões o que equivale a 40% do saldo comercial brasileiro, que foi de US\$ 61,8 bilhões. Para acompanhar o crescimento do setor, a transformação e os desafios de mercado, a mineração vem adotando cada vez mais a automação como um fator de segurança e produtividade em suas operações.

Segundo Voronov *et al.* (2020) centenas de pessoas e dezenas de máquinas pesadas de carga e transporte estão envolvidas no processo mineiro, trabalhando em jornadas exaustivas, condições climáticas severas e cronogramas apertados. A rotina de trabalho e monotonia levam a situações de fadiga, que conseqüentemente, podem causar acidentes. Situações como aprofundamento da cava, complicações na operação, risco de ruptura de bancadas e outros problemas agravam a situação de risco e criam paralisações na operação.

Com estas condições de atenção, tornar os processos mais produtivos e retirar operadores da condição de risco se torna crucial, sendo o transporte autônomo uma boa alternativa. Diversos fabricantes de equipamentos têm investido no desenvolvimento de tecnologia embarcada e equipamentos remotamente operados ou totalmente autônomos para a indústria da mineração. À medida que a tecnologia se consolida através da divulgação dos resultados alcançados pelos sistemas já existentes, o número de equipamentos e usuários vêm crescendo nas empresas e diversos sistemas autônomos tem sido implementado ao redor do mundo e como consequência do desenvolvimento deste mercado têm-se uma tendência na redução de custos de aquisição e abertura de concorrência. Além disso, o desenvolvimento de caminhões autônomos está sendo bem aceito em áreas privadas, como a mineração, por ser um ambiente de mais fácil controle, ao contrário de vias públicas.

Uma decisão sobre caminhões autônomos pode ser tomada nas etapas de análise de viabilidade de um novo projeto ou nas operações de mineração em andamento ao planejar a substituição da frota em função da depreciação dos equipamentos. Entretanto, por conta do alto

investimento envolvido, este tipo de decisão requer uma validação operacional, através de testes em campo, de forma a criar evidências técnicas para uma tomada de decisão segura acerca da mudança, analisando a viabilidade de aplicação da tecnologia ou produto na realidade operacional de cada mina. Como a operação autônoma, mesmo que em teste, é extremamente complexa, deve-se definir etapas bem estruturadas de projeto e mapear corretamente todos os indicadores e parâmetros a serem verificados para uma validação acurada a tecnologia ou produto testado.

## **1.2 - Definição e Delimitação do Problema**

Além da segurança, o fator produtividade e custos também têm sido decisivos na substituição do sistema tradicional para o autônomo. Segundo Silva (2011) os custos relacionados a carregamento e transporte representam mais da metade do custo da operação de uma mina, porém uma implementação mal sucedida de um sistema autônomo, pode ser ainda mais onerosa. Desta forma o trabalho tem como foco a realização roteirizada e padronizada de teste de caminhões autônomos em uma mina a céu aberto, mapeando e implementando parâmetros de monitoramento e indicadores de performance, bem como a infraestrutura necessária para execução do teste. O trabalho busca, também, gerar informação base para conduzir equipes de projeto em testes com caminhões autônomos, através da criação de uma metodologia para implementação de teste de caminhão com a utilização de fluxograma de processos como ferramenta.

## **1.3 - Contextualização**

A aquisição de uma frota autônoma ainda requer grande investimento, para isso é necessário a análise de indicadores para comprovação dos ganhos com a troca de sistema. Em função das particularidades de cada mina é importante selecionar os indicadores com base na realidade operacional de cada uma delas, por isso um estudo detalhado de quais indicadores devem ser analisados é de extrema importância no processo de avaliação da implantação do sistema autônomo de transporte.

Para a implantação bem-sucedida de um sistema autônomo é necessário analisar os principais riscos e oportunidades envolvidos no processo. Através da realização de testes para avaliar o comportamento da solução proposta no ambiente real de operação, reproduzindo ao

máximo o cenário operacional da mina é possível analisar estes riscos e oportunidades, além do mapeamento de KPI's.

#### **1.4 - Problematização**

Diante das informações levantadas surgem algumas questões. Qual fluxo de processo deve ser seguido para um teste de frota autônoma? Quais parâmetros operacionais e indicadores devem ser mapeados e implementados para os testes? Quais recursos devem ser disponibilizados para que os testes ocorram?

#### **1.5 - Justificativa**

Na mineração a automação foi desenvolvida inicialmente com o objetivo de proteger a saúde e a segurança dos trabalhadores, porém também é evidente os benefícios significativos que a automação pode trazer em termos de produção e produtividade. Com longas jornadas de trabalho, os erros humanos causados pela fadiga e cansaço podem causar falhas humanas, que podem ser eliminadas com a automação (MULLARD, *et al.*, 2009).

Muitos benefícios são citados em relação ao ganho de eficiência, segurança e produtividade alcançadas com a automação, mas é necessário um estudo mais detalhado e baseado em indicadores para comprovar tais ganhos dentro da realidade operacional de cada mina, porém nem todos os indicadores utilizados na gestão de frota tradicional são aplicados aos caminhões autônomos, por isso o mapeamento dos indicadores e parâmetros a serem analisados e a realização de testes na realidade operacional são tão importantes.

#### **1.6 - Hipótese Norteadora**

A hipótese levantada é que o sistema autônomo necessite de uma readequação nos indicadores de desempenho, bem como a criação de novos indicadores e parâmetros para coleta de dados acurados durante os testes, além de uma infraestrutura para suporte à operação autônoma.

## **1.7 - Objetivos**

O objetivo deste trabalho é realizar um mapeamento do processo necessário para a realização de teste de caminhões autônomos em uma mina a céu aberto com foco na criação de uma metodologia de implementação, elencando os principais riscos e oportunidades do processo.

Como objetivos específicos tem-se:

- Pesquisar e avaliar os principais termos e conceitos que envolvem o transporte autônomo em minas a céu aberto;
- Identificar os recursos de infraestrutura necessários para um campo de testes de caminhões autônomos;
- Criar um fluxograma de atividades para parametrização de testes de autônomos;
- Definir os indicadores de desempenho da frota de transporte que devem ser analisados, modificados ou criados durante os testes de validação para caminhões autônomos;
- Nortear a decisão da alta direção da empresa na continuidade de testes para aquisição de caminhões autônomos.

## **2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Essa seção contém a fundamentação teórica necessária à compreensão do tema. Neste capítulo são apresentados conceitos e definições sobre o sistema autônomo de transporte em mina a céu aberto.

### **2.1 - Exploração de mina a céu aberto**

As explorações de mina a céu aberto são aquelas nas quais a escavação está em contato com o ar livre, não compreendendo operações em locais confinados, cercadas em todo seu perímetro pelas rochas encaixantes. Ao contrário das escavações subterrâneas nas quais ocorrem em subsolo. Quando a opção pela lavra a céu aberto não for imediata, deve-se optar por um estudo de viabilidade detalhado para escolha do método mais adequado. Pode também haver migração da lavra a céu aberto para subterrânea, nestes casos a mudança ou escolha deve-se basear no fator econômico, segurança e de aproveitamento da jazida. A lavra a céu aberto possui maior aplicação em comparação a lavra subterrânea, por sua maior capacidade produtiva, menor diluição e menor custo. Mas também possui as suas desvantagens, dentre elas pode-se destacar o grande investimento inicial, como por exemplo a compra de equipamentos, além da sua limitação em relação a profundidade (COUTO, 1990).

Segundo Curi (2014) a lavra a céu aberto, por questões econômicas e tecnológicas, se fundamenta melhor em relação a subterrânea. Graças ao avanço tecnológico, a lavra a céu aberto, tem atingido profundidades cada vez maiores, como por exemplo o sistema de geoposicionamento, rede de comunicação de dados e sistema de gerenciamento de frota.

## **2.2 - Métodos de lavra a céu aberto**

O método de lavra é selecionado de acordo com a heterogeneidade e características da jazida, sendo a geometria e profundidade do minério as de maior relevância, além de fatores como: demanda de produção, seletividade de lavra e REM. Através do modelo de blocos e do teor de corte, teor mínimo no qual determina-se os blocos de minério e estéril, podendo assim definir o custo do projeto, através da relação de quantas unidades de massa ou volume são necessários para liberação de uma unidade de massa ou volume de minério (NEWMAN *et al.*, 2010).

Na análise de viabilidade econômica de uma mina, a seleção do método de lavra é um dos principais fatores a ser verificado. Logo, definindo o método fica definido a forma de operar a mina, e conseqüentemente, os tipos de equipamentos para o projeto da cava conforme (MACEDO *et al.*, 2001).

A lavra em cava (*open pit*), lavra em pedreiras (*quarry mining*) e a lavra em tiras (*strip mining*) são os principais métodos a céu aberto. Na lavra em cava, o material de cobertura é lavrado e destinado para uma área específica até que o minério esteja exposto. Assim que exposto o minério é lavrado por meio de bancadas, de cima para baixo. Para este método deve-se considerar a estabilidade dos taludes, levando em conta o ângulo de talude que pode variar em função das características do material, e a altura da bancada. A largura das bermas também deve ser dimensionada com base no porte de equipamentos e de tal forma que comporte o material desmontado durante a operação. O método em cava apresenta grande produtividade, flexibilidade, seletividade e menor diluição, o que o torna largamente utilizado (PERONI, 2008).

A lavra em tiras é utilizada principalmente em depósitos de carvão e bauxita por sua formação tabular ou acamadada, possui uma grande escala de produção em função dos

equipamentos de grande porte que podem ser utilizados, como por exemplo os mineradores contínuos, *shovels e draglines*.

A lavra em pedreiras está ligada a lavra de rochas ornamentais, rochas de revestimento ou lavra de agregados para aplicação imediata na construção civil e tem boa representatividade na mineração brasileira.

### **2.3 - Operações Unitárias**

As operações de lavra consistem em quatro operações unitárias sendo elas: perfuração, desmonte, carregamento e transporte. A sequência e a forma de execução das operações mineiras variam em função das peculiaridades que cada mina possui, pois levam em conta o tipo de minério e estéril, geometria do depósito, topografia, compactação (desmonte por explosivos ou mecânico), diluição, recuperação, empolamento, entre outros. Todas essas atividades devem ser muito bem planejadas e gerenciadas. Um planejamento operacional criterioso garante entrega de produção na quantidade e qualidade planejada, por isso a correta seleção e dimensionamento de equipamentos é um ponto crucial no empreendimento mineiro (CURI, 2014).

#### *2.3.1 Carregamento e transporte*

As operações de carregamento e transporte correspondem a retirada de material de uma origem para um destino, sendo a origem à frente de lavra e os destinos podem variar de acordo com a classificação e objetivo do material, sendo os mais comuns: depósito de minério, britador e depósitos de estéril (QUEVEDO, 2009). Segundo Silva (2011) os custos relacionados a carregamento e transporte representam mais da metade do custo da operação de uma mina a céu aberto. Em função disso, a correta seleção de equipamentos é imprescindível para a viabilidade do empreendimento, podendo torná-la lucrativa ou, se feita de forma imprecisa, inviabilizá-la.

Segundo Amaral (2008) a seleção de equipamentos não se dá por um processo bem definido, uma vez que cada mina possui sua característica de operação, o que influencia na escolha dos equipamentos. Para Silva (2011) a definição de quais equipamentos ou sistemas que são utilizados deve-se considerar diversos aspectos, como por exemplo: capacidade

manuseada, seletividade, topografia do terreno, distância de transporte, infraestrutura, empolamento, entre outros.

De acordo com Amaral e Pinto (2010), a frota de carregamento e transporte devem ser compatíveis, a quantidade de equipamentos de transporte deve ser capaz de atingir a máxima produtividade do equipamento de carregamento, de forma a otimizar o ciclo de ambos os equipamentos. Para Silva (2011) selecionados os equipamentos que atendam as condições de trabalho deve-se selecionar também o porte dos equipamentos, objetivando uma maior eficiência global durante a operação conjugada e atingimento da demanda de produção.

Segundo Silva (2011) alguns fatores devem ser considerados durante a seleção de equipamentos, sendo alguns deles: características espaciais do depósito, sendo estes os de maior relevância, condições geológicas e hidrogeológicas do depósito, aspectos econômicos que envolvem o plano de produção previsto, seletividade, diluição e recuperação de lavra, REM disponibilidade de capital, custo operacional, geotecnia de mina e aspectos ambientais.

De acordo com o mesmo autor, considerados os fatores listados anteriormente, outras restrições devem ser consideradas a fim de se manter a eficiência da operação durante a operação conjugada, tais como a quantidade de passes do equipamento de carga durante a etapa de carregamento, sendo o ideal o número de 3 a 5 passes, sendo essa quantidade considerada como um bom equilíbrio. Para uma quantidade menor de passes deve-se atentar se o tamanho da caçamba da unidade de carregamento é compatível com a de transporte, a fim de evitar-se danos a estrutura do equipamento de transporte ou derramamento de carga. Também é necessário verificar se o menor tempo de carregamento não provoca fila no carregamento, buscando sempre o equilíbrio entre tempo de fila e ociosidade da unidade de carregamento (SILVA, 2011).

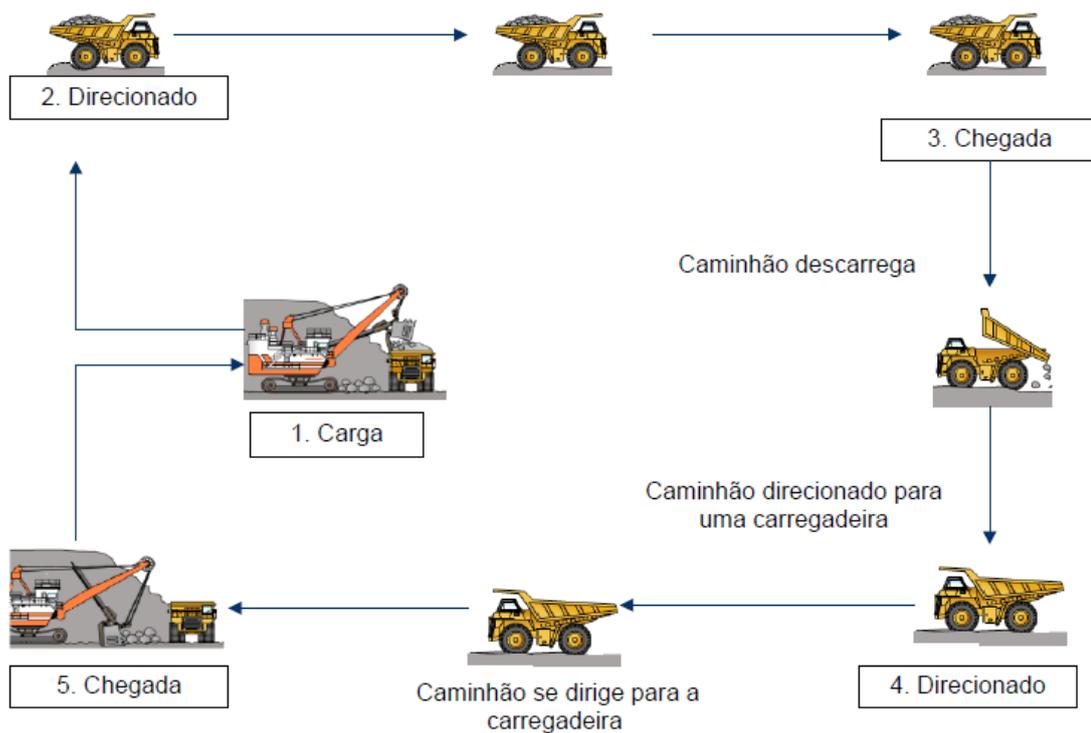
Os equipamentos mais utilizados para o carregamento são as escavadeiras e carregadeiras (CHANDA; HARDY, 2011; MONIRI-MORAD *et al.*, 2019). Para pequenas e médias de distâncias, até em torno de 5 quilômetros, emprega-se caminhões basculantes ou fora de estrada, pois possuem alta capacidade de produção e baixos custos, para maiores distâncias deve-se avaliar a aplicação de correias transportadoras. (ALMEIDA; NEVES; FIGUEIREDO, 2018; MONIRI-MORAD *et al.*, 2019).

O ciclo de transporte tem início na frente lavra, podendo ser de minério ou estéril, sempre com a premissa de atendimento da produção requerida. Uma correta alocação dos equipamentos tem enorme influência na produtividade, uma vez que um dimensionamento incorreto pode ocasionar fila no carregamento ou ociosidade do equipamento de carga, aumentando o custo de produção (MONIRI-MORAD *et al.*, 2019).

O tempo total de ciclo do transporte é apresentado na Figura 1, de acordo com Quevedo (2009). O ciclo de produção comum dos caminhões inicia-se através da criação e alocação do caminhão em uma atividade, na qual ocorre através do sistema de gestão de frota. A partir da alocação o caminhão desloca-se vazio para a frente de lavra na qual foi designado. Em seguida, ocorre a manobra para carregamento, quando o caminhão deve manobrar de ré para posicionar sua caçamba próxima ao equipamento de carga para que seja feita a transferência do material *in situ* para a báscula do caminhão. Caso outro equipamento esteja sendo carregado o equipamento que aguarda para carregamento se mantém em fila de carregamento, este é um indicador importante no que se diz respeito a correta alocação de recurso na frente de lavra, usualmente o valor limite para fila no carregamento é calculado em função do tempo de carregamento. Depois de posicionado no local adequado, dá-se início ao carregamento e após alguns passes atinge-se a capacidade de carga do caminhão e então ele é liberado. Com o caminhão já carregado, ele se desloca cheio até o seu destino final, que pode ser um britador ou estoque, para o minério, ou no caso do estéril, para uma pilha de estéril. Chegando ao seu destino, caso exista disponibilidade para o basculamento, se inicia a manobra para descarga e em seguida o basculamento, quando é realizado o despejo e esvaziamento completo de material contido na caçamba, encerrando assim o ciclo.

Os deslocamentos cheios e vazios são diretamente influenciados pela velocidade média (VM) e a distância média de transporte (DMT). Pash (2018) menciona outro atraso operacional que comumente é ignorado, o tempo que o equipamento de carregamento aguarda a chegada de caminhão.

**Figura 1** – Ciclo de Transporte



Fonte: QUEVEDO (2009)

Os tempos de fila e espera dos equipamentos de transporte impactam negativamente na produtividade, sendo responsável pelo mau desempenho do indicador. Para evitar esse impacto, é fundamental dimensionar adequadamente a frota para reduzir os tempos de ociosidade tanto dos equipamentos de transporte quanto dos equipamentos de carga. O ideal é manter um equilíbrio entre os indicadores de fila e ociosidade. A fila representa o tempo de espera de um caminhão na praça de carregamento aguardando o equipamento de carga, enquanto a ociosidade refere-se ao tempo não produtivo de um equipamento de carga aguardando a chegada de um caminhão para o carregamento (PASCH; ULUDAG, 2018).

## 2.4 – Dimensionamento de Produção

A gestão adequada de uma empresa envolve a medição e o entendimento de seus indicadores e resultados. Um gestor não é capaz de melhorar o desempenho da empresa se não for capaz de medi-lo. Os indicadores são uma ótima ferramenta para monitorar e melhorar processos, são indicados para medir a eficiência dos processos frente ao planejado. Os indicadores chave de desempenho ou *Key Performance Indicators* (KPIs) são as metas mais

detalhadas das organizações, que direcionam as atividades dos gestores para torná-las viáveis (CALDEIRA, 2012).

É de fundamental importância a medida de desempenho na avaliação da gestão do negócio. Desta forma, na operação de mina é feito o dimensionamento do plano de produção utilizando-se indicadores relacionados as capacidades dos equipamentos de carregamento e transporte. As capacidades dos caminhões e escavadeiras podem ser definidas em termos de toneladas máximas de material que podem ser transportadas ou extraídas por um período de tempo ou em termos de horas disponíveis para uso (toneladas/hora). Uma estimativa correta desses indicadores é fundamental para que o realizado tenha aderência ao planejado. Para caminhões e escavadeiras os indicadores mais comuns são a disponibilidade física, a utilização física e a produtividade (BLOM; PEARCE; STUCKEY, 2019).

#### 2.4.1 Estratificação das Horas Calendário

Para determinação dos principais indicadores de dimensionamento de frota, como UF, DF e conseqüentemente a capacidade produtiva, é necessário realizar a estratificação das horas calendário, determinando a árvore de horas programada no sistema de gestão de frota. Segundo Quevedo (2009) as horas calendário referem-se as horas úteis de operação em determinado período, por exemplo, considerando-se um mês de 30 dias onde um caminhão opera 24 horas por 7 dias, tem-se 720 horas calendário por caminhão, resultado do produto de dias e horas. A estratificação de horas calendário pode ser customizada para a realidade de cada mineradora, porém o topo da árvore de horas deve ser respeitado como boa prática.

Pode-se dividir as horas calendário em algumas categorias:

- Horas Programadas (HP): tempo em que o equipamento está programado para operar, as horas programadas podem variar em função de diferentes demandas de produção ao longo dos anos, para isso programa-se os equipamentos necessários para aquela produção anual e os que não forem programados podem ficar em *stand by* ou serem alocados para outras atividades inclusive em outras minas pertencentes a mineradora;
- Horas Inativas (HI): tempo em que o equipamento não está programado, neste período o equipamento não gera custos com manutenção, este tempo de

inatividade é definido conforme demanda de produção e/ou definição estratégica da empresa;

- Horas de Manutenção (HM): tempo em que o equipamento fica indisponível em função de manutenção. Pode-se dividir em Horas de Manutenção Preventiva (HMP) e Horas de Manutenção Corretiva (HMC), sendo que se diferem por serem programadas ou não programadas, respectivamente. Estas horas tem relação direta com a DF e influenciando diretamente na capacidade produtiva da frota;
- Horas Disponíveis (HD): tempo em que o equipamento está disponível para operar e não está em manutenção;
- Horas Trabalhadas (HT): tempo de operação do equipamento é dividido em Horas Trabalhadas Produtivas (HTP), quando ele está produzindo efetivamente, principalmente nas atividades do ciclo, e Horas Trabalhadas Não Produtivas (HTNP), quando ele está realizando atividades secundárias, como infraestrutura, pesagens, deslocamento entre frentes, entre outras.
- Horas Ociosas (HO): tempo improdutivo do equipamento, o equipamento está disponível, porém sem operar. Estas horas impactam negativamente na UF da frota e são objeto de estudo na gestão de frota a fim de se identificar os gargalos operacionais. As horas em que o equipamento não está em operação são divididas em Horas Ociosas Gerenciáveis (HOG), quando a parada é devido a questões internas como refeições, trocas de turno, reuniões de segurança ou falta de operador, e Horas Ociosas Não Gerenciáveis (HONG), quando a parada é causada por fatores externos à operação, como condições climáticas adversas ou acidentes;

De forma mais simplificada, as horas são organizadas e representadas de acordo com a Figura 2 abaixo.

**Figura 2 – Árvore de Horas**

Horas Calendário (HC)					
Horas Programadas (HP)					Horas Inativas (HI)
Horas Disponíveis (HD)				Horas de Manutenção (HM)	
Horas Trabalhadas (HT)		Horas Ociosas (HO)		Horas de Manutenção Preventiva	Horas de Manutenção Corretiva (HMC)
Horas Trabalhadas Produtivas (HTP)	Horas Trabalhadas Não Produtivas (HTNP)	Horas Ociosas Gerenciáveis (HOG)	Horas Ociosas Não Gerenciáveis (HONG)		

Fonte: Próprio Autor (2022).

#### 2.4.2 Disponibilidade Física

Na literatura alguns indicadores de frota são bem consolidados, como por exemplo o indicador de disponibilidade física. Apesar de ser um indicador ligado diretamente à manutenção ele tem grande valia no diagnóstico de condições de estrada, fator de carga e capacitação dos operadores. Fatores como desorganização da mina, condições de acessibilidade adversas, operações em vários turnos e manutenção preventiva e corretiva fora do programado afetam a disponibilidade física.

Disponibilidade Física (DF) corresponde à parcela das horas que o equipamento está disponível para operar, ou seja, não está em manutenção, em relação as horas calendário, conforme Equação 1.

$$DF = \frac{HC - HM}{HC} \times 100 \quad [1]$$

Onde:

- DF é a disponibilidade física representada pela percentagem do tempo que o equipamento fica disponível para operar;
- HC corresponde às horas calendário que são calculadas por ano, mês ou dia, a depender do horizonte analisado;
- HM corresponde às horas que o equipamento fica indisponível para operação em função de manutenção corretiva, preventiva ou preditiva.

O objetivo de mensurar o indicador de disponibilidade física é verificar e garantir que o recurso, neste caso os equipamentos, estejam disponíveis para a operação para que as metas de produção possam ser atingidas e a alimentação da usina não seja paralisada ou prejudicada.

Problemas com a DF podem ser indicativo de más condições dos acessos ou excesso de carga no equipamento de transporte, outro fator que influencia no indicador é a experiência e as boas condutas durante a operação dos equipamentos, que depende de um bom programa de treinamento e as boas práticas durante a operação.

#### 2.4.3 Utilização Física

Outro indicador importante na operação de mina é a utilização física, ela é o principal indicador de desempenho para análise do uso inteligente do recurso disponível.

Utilização Física (UF) é medida pela porcentagem de horas que o equipamento ou ativo está operando em relação à quantidade de horas disponível para operar, conforme Equação 2.

$$UF = \frac{HT}{HC-HM} \times 100 \quad [2]$$

Onde:

- UF é a utilização física representada pela porcentagem do tempo que o equipamento está trabalhando em relação ao que fica disponível para operar;
- HT corresponde às horas que o equipamento ou ativo está operando (ligado);
- HC corresponde às horas calendário que são calculadas por ano, mês ou dia, a depender do horizonte analisado;
- HM corresponde às horas em que o equipamento fica indisponível para operação em função de manutenção corretiva, preventiva ou preditiva.

Fatores como falta de operador, causado pela falta de mão-de-obra ou absenteísmo, bem como falta de gerenciamento das paradas operacionais, como troca de turno, refeição, etc. podem causar a queda do indicador.

O mal dimensionamento do recurso, mais caminhões disponíveis do que o necessário, também podem prejudicar este indicador. Fatores externos como chuva ou intempéries diversas

também prejudicam o alcance do indicador. Por isso é importante manter o controle de paradas operacionais, gerenciáveis ou não gerenciáveis, para uma alta utilização do recurso disponível.

#### 2.4.4 Produtividade de Transporte

A produtividade é um importante fator de análise da frota. A Equação 3 apresenta como pode ser calculada a produtividade dos caminhões, levando em consideração a massa transportada e o ciclo de transporte.

$$PH = \frac{CM}{\left(TMC+TMB+TFC+TFB+TC+TB+\left(\frac{DMT}{\text{Velocidade}}\right)\right)} \quad [3]$$

Onde:

PH corresponde a produtividade horária contabilizada em toneladas por horas;

CM é a carga média em toneladas;

TMC é o tempo de manobra em horas no carregamento;

TMB é o tempo em horas no basculamento;

TFC é o tempo em fila em horas para carregar;

TFB é o tempo de fila em horas para bascular;

TC é o tempo de carregamento em horas;

TB é tempo em basculamento em horas;

DMT é a distância média de transporte em quilômetros;

VM é a velocidade média contabilizada em quilômetros por hora.

#### 2.4.5 Cálculo de Produção

De acordo Clarke *et al* (1990), a produção pode ser estimada através do produto da disponibilidade física, utilização, produtividade efetiva, horas trabalhadas programadas e

número de equipamentos, onde o produto destes determina a produção em um determinado período de tempo, conforme a Equação 4:

$$PD = DF \times UF \times PR \times HP \times Nequip \quad [4]$$

Onde,

- PD corresponde a produção total;
- DF é a disponibilidade física representada pela percentagem do tempo que o equipamento fica disponível para operar;
- UF é a utilização física representada pela percentagem do tempo que o equipamento está trabalhando em relação ao que fica disponível para operar;
- PR corresponde a produtividade efetiva dos equipamentos;
- HP corresponde às horas programadas para o equipamento;
- Nequip é o número de equipamentos na frota.

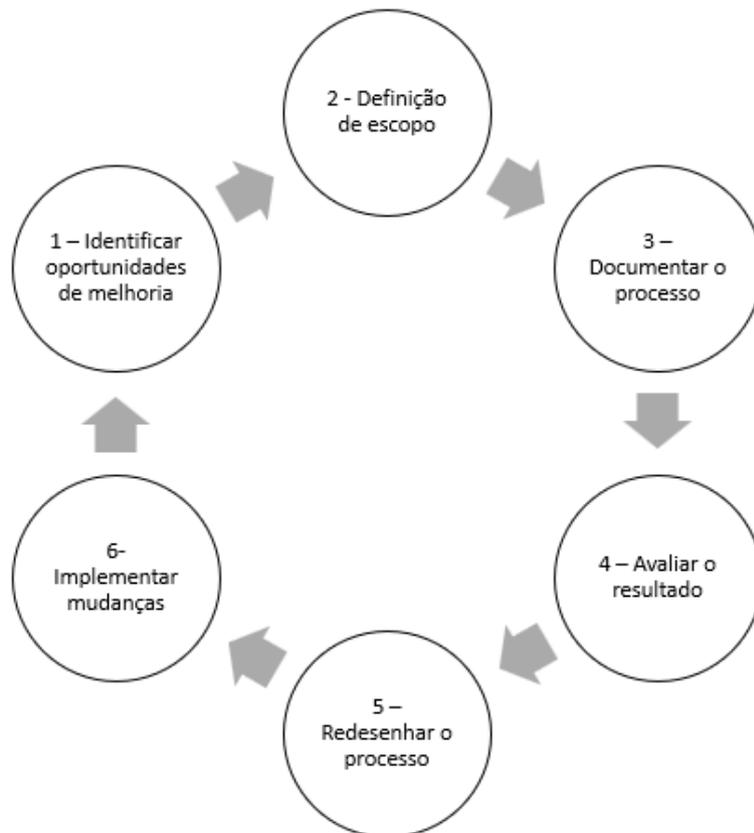
Para um resultado confiável, os indicadores utilizados devem representar a realidade operacional, para que o recurso solicitado não seja subestimado ou superestimado, fazendo-se necessária uma estimativa fundamentada no histórico executado, através de coletas em campo ou da própria consulta no sistema de gerenciamento de frota ou manual do fabricante. Além disso, a otimização da frota pode ser feita através da alocação dinâmica no sistema de gerenciamento de frota, aumentando a produção dos equipamentos de mina.

## **2.5 – Fluxograma de processos**

Conforme Oliveira (2007), processo é conjunto de atividades sequenciais que possuem uma interligação lógica, com a finalidade de atender a expectativa entre as partes envolvidas, sejam elas internas ou externas à empresa. As áreas da organização precisam estar envolvidas na criação e execução dos processos. Uma vez que para executar os passos do fluxograma buscando um objetivo definido, transformando entradas em saídas, é necessário que o recurso humano, ferramentas e métodos estejam integrados (CÔRTEZ; CHIOSSI, 2001).

A análise do processo consiste no acompanhamento do trabalho executado e como ele pode ser redefinido. Neste contexto, a identificação da oportunidade para melhoria e a posterior revisão de um processo são atividades cíclicas, onde para o ciclo de aperfeiçoamento contínuo enquanto houver oportunidade de melhoria a revisão do processo deve ocorrer (KRAJEWSKI; RITZMAN; MALHOTRA, 2009). Na Figura 3, é possível verificar as etapas de análise de um processo.

**Figura 3** – Etapas de análise de processo



Fonte: Adaptado de Krajewski, Ritzman e Malhotra (2009).

Para Simcsik (2001) os fluxogramas são métodos para visualizações de informações, de fácil compreensão por diversos níveis da organização. Apesar da existência de diversos tipos de gráficos, o fluxograma é o gráfico universal, que representa o fluxo ou sequência de um trabalho, produto ou documento.

## 2.6 – Automação

Parasuraman *et al.* (2000) definiram a automação como a substituição total ou parcial de uma função realizada anteriormente por um humano. Sendo seu objetivo controlar sistemas dinâmicos de forma a reproduzir o comportamento físico e intelectual do ser humano.

Segundo a *International Organization for Standardization* (2017) através da ISO 17757:2017, algumas definições que envolvem o sistema de automação do transporte:

Automático: processo ou parte dele, onde uma máquina segue regras bem definidas;

Automação: técnica, método ou sistema de controle e operação por meios automáticos com o mínimo de intervenção humana;

Autônomo: processo ou máquina que se destina a fazer tarefas sem intervenção humana ou controle direto;

### 2.6.1 Automação na Mineração

Segundo Parreira (2013) A automação na mineração pode ser feita de três formas: teleoperação direta, onde os trabalhadores controlam o equipamento de uma sala de controle; operação remota, feita por joysticks a uma distância segura; e operação autônoma, na qual os equipamentos operam inteiramente controlados por computador.

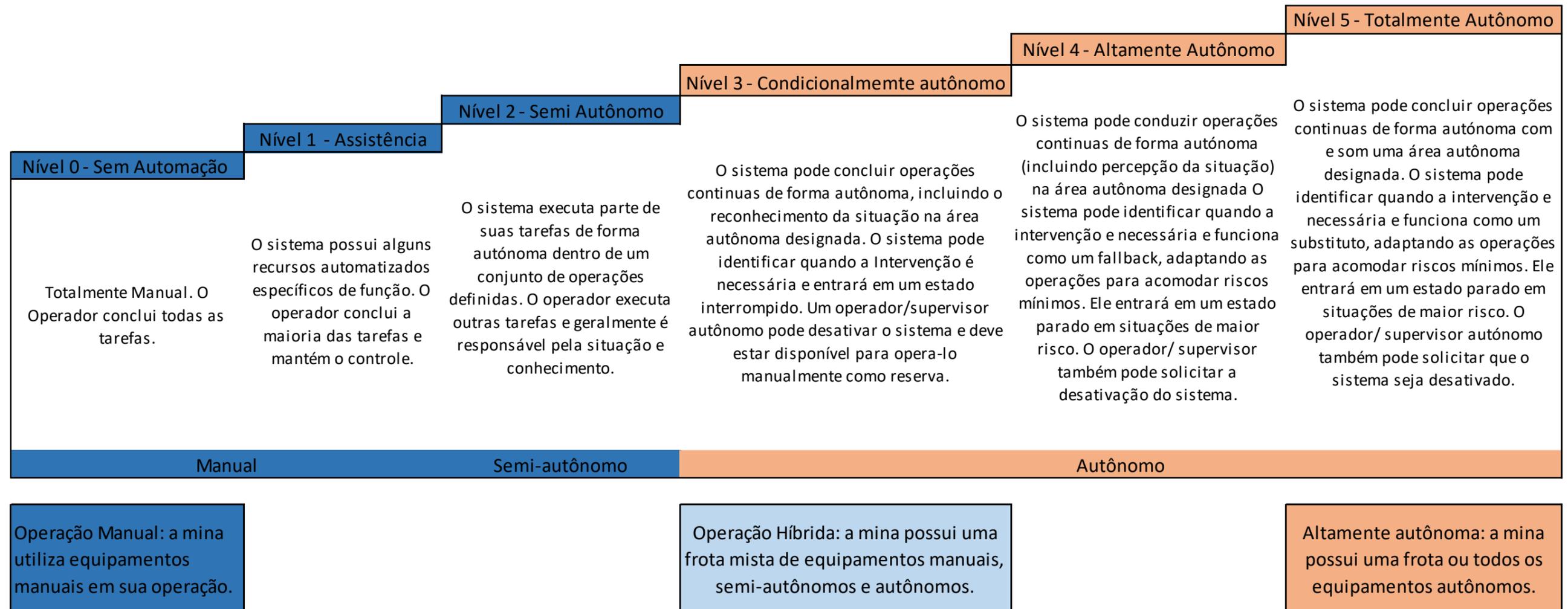
Na mineração a automação foi desenvolvida inicialmente com o objetivo de proteger a saúde e a segurança dos trabalhadores, porém também é evidente os benefícios significativos que a automação pode trazer em termos de produção e produtividade. Com longas jornadas de trabalho os erros humanos causados pela fadiga e cansaço podem causar falhas humanas, que podem ser eliminadas com a automação. A escala de automação das mineradoras varia podendo ser aplicada desde o transporte até as pequenas automações e atingem grandes e médias mineradoras. Independente da escala de automação é nítido os benefícios em relação a eficiência, segurança e produtividade alcançadas com a automação (MULLARD, *et al.*, 2009).

Segundo Voronov *et al.* (2020) existem quatro níveis de automação de equipamentos de mineração. O primeiro nível é o controle remoto, solução mais barata e simples, utilizado em sua maioria para escavadeiras e tratores em locais com risco de queda de blocos, explosão ou

deslizamentos. O segundo nível é o controle telemétrico, onde operador controla o equipamento por uma distância considerável e segura. No terceiro nível, um operador regula as atividades de várias unidades de equipamentos que se movem de acordo com o algoritmo definido pelo programa. O quarto nível é a automação total, quando o equipamento funciona de forma independente, sem intervenção humana.

Segundo o *Global Mining Guidelines (2021)* os níveis de automação dos equipamentos variam entre nível 0, sem nenhuma automação, até nível 5 com equipamentos totalmente autônomos, conforme Figura 4.

**Figura 4 – Níveis de automação**



Fonte: Adaptado de *Global Mining Guidelines* (2021).

As primeiras tentativas de automatizar equipamentos de mineração foram feitas na década de 1960. A fabricante Komatsu foi a primeira a testar caminhões em 1990, seguida pela Caterpillar em 1995. Porém, somente em 2007 os caminhões autônomos foram utilizados em uma mina. Os fabricantes que mais investem em equipamentos não tripulados são Komatsu, Caterpillar, e Hitachi, sendo que Komatsu e Caterpillar já dominam o mercado, possuindo a maior frota autônoma em operação (VORONOV, VORONOV e MAKHAMBAYEY, 2020).

### 2.6.2 Implantação de sistema autônomo

Segundo o *Global Mining Guidelines* (2021) existem muitas maneiras pelas quais as minas podem implementar sistemas autônomos. A forma de implementação pode ser:

- Implementação lenta: Uma abordagem de baixo risco, mas de custo mais alto, em que a implementação é estendida por um longo período de tempo com vários pontos de verificação (por exemplo, de conceito, testes, vários lançamentos). Essa abordagem permite que a mina incorpore esforços de pesquisa e desenvolvimento;
- Implementação em fases: Uma abordagem de risco médio e custo médio em que a implementação é concluída em estágios ritmados com dois ou três pontos de verificação. Essa abordagem geralmente envolve a implementação de uma combinação de soluções maduras e ágeis;
- Implementação rápida: Uma abordagem de maior risco, mas de menor custo, em que o novo sistema substitui completamente o antigo. Essa abordagem geralmente envolve a implementação de soluções comerciais maduras.

A implementação de sistemas autônomos é uma mudança organizacional e cultural, desta forma o gerenciamento de mudanças deve ser feito inicialmente em todas as fases do processo. A gestão de mudanças visa alcançar uma situação em que as partes interessadas tenham o nível adequado de confiança de que a mudança é útil, apoiem o processo de implementação e compreendam os benefícios e riscos do novo sistema.

A automação está revolucionando diversos setores em ritmo acelerado. Para que se obtenha sucesso em um processo de implantação de sistema autônomo é importante ter um projeto consolidado, onde seja possível identificar e analisar os níveis de interesse, expectativas

e prioridades de todas as partes envolvidas na mudança. O plano deve levar em conta questões relacionadas aos riscos e gerenciamento, controle de qualidade, planos de comunicação e estratégias de saída, estes são fatores essenciais para o sucesso do projeto (MEECH, 2012).

### 2.6.3 Requisitos para implantação

A área da mina deve ser segregada fisicamente em área de equipamentos tripulados e não tripulados. Todos os veículos que entram na zona não tripulada (AOZ) são equipados com transceptores de satélite que fornecem rastreamento, perímetro de segurança ou zona de exclusão. Os caminhões recebem instruções de uma sala de controle localizada remotamente por meio de uma rede de comunicações. As máquinas de carregamento (geralmente tripuladas) possuem sensores de localização para que os caminhões fiquem bem embaixo da caçamba antes do carregamento. A sala de controle pode instruir caminhões por meio de redes sem fio. Subsistemas de detecção de objetos equipados com *radar* e/ou *lidar* são programados para parar o caminhão se um obstáculo surgir em seu caminho (VORONOV, VORONOV e MAKHAMBAYEY, 2020).

Segundo a ABNT NBR ISO 17757:2022, que especifica os critérios de segurança para as máquinas autônomos e semiautônomos, devem ser adotadas algumas medidas de segurança para esta modalidade de operação.

**Sistema de parada:** todo equipamento autônomo deve possuir um meio de ser colocado em estado de parada a partir de distância segura e remota. Se sistema autônomo incluir um sistema de supervisão do equipamento remoto, este sistema deve ter um sistema de parada total para o operador colocar todos os equipamentos autônomos sob supervisão em um estado de parada. Quando necessário, em função dos riscos, o sistema autônomo deve ser equipado com um sistema de parada remota adicional que seja distinto do sistema de parada total, este sistema deve permitir que uma pessoa coloque todos os equipamentos autônomos dentro da faixa requerida (com base na apreciação de riscos) do dispositivo de parada remota em um estado de parada.

**Indicadores visuais:** O equipamento deve ser equipamento com sistema luminoso que identifique o modo de operação, sendo a luz verde intermitente utilizada para o modo manual e a luz azul intermitente utilizada para o modo autônomo.

**Indicadores sonoros:** A norma indica que o equipamento possua sistema sonoro que seja capaz de fornecer as mesmas advertências sonoras que o canteiro de obras estiver utilizando para a partida do motor, alarme de pré-movimento e movimento em máquinas tripuladas.

**Proteção contra incêndios:** Um sistema de supressão de incêndio deve ser fornecido se a apreciação de riscos assim requerer. Os meios para a sua ativação (isto é, automática ou remotamente) devem ser determinados pela apreciação de riscos.

**Frenagem e Direção:** Todo sistema autônomo deve ser capaz de manter uma velocidade segura e um rumo efetivo. Como comandos eletrônicos são utilizados, são necessários controles de segurança adicionais. Todos os sistemas autônomos devem ter a capacidade de parar a máquina. Além disso, os sistemas de controle devem ser capazes de frear a máquina de forma segura enquanto ela opera dentro do ambiente especificado, por exemplo, em condições adversas. O sistema também deve garantir que as temperaturas e pressões de operação seguras nos sistemas de frenagem e direção sejam alcançadas antes que a máquina seja colocada em operação autônoma.

**Adaptação às condições ambientais:** Com base no risco, o sistema autônomo deve ser capaz de se adaptar às condições ambientais. Estas adaptações podem incluir o uso de operadores humanos ou sistemas automatizados para realizar ajustes de velocidade, desativar operações, fechar áreas ou outros ajustes, conforme necessário, para manter a operação segura.

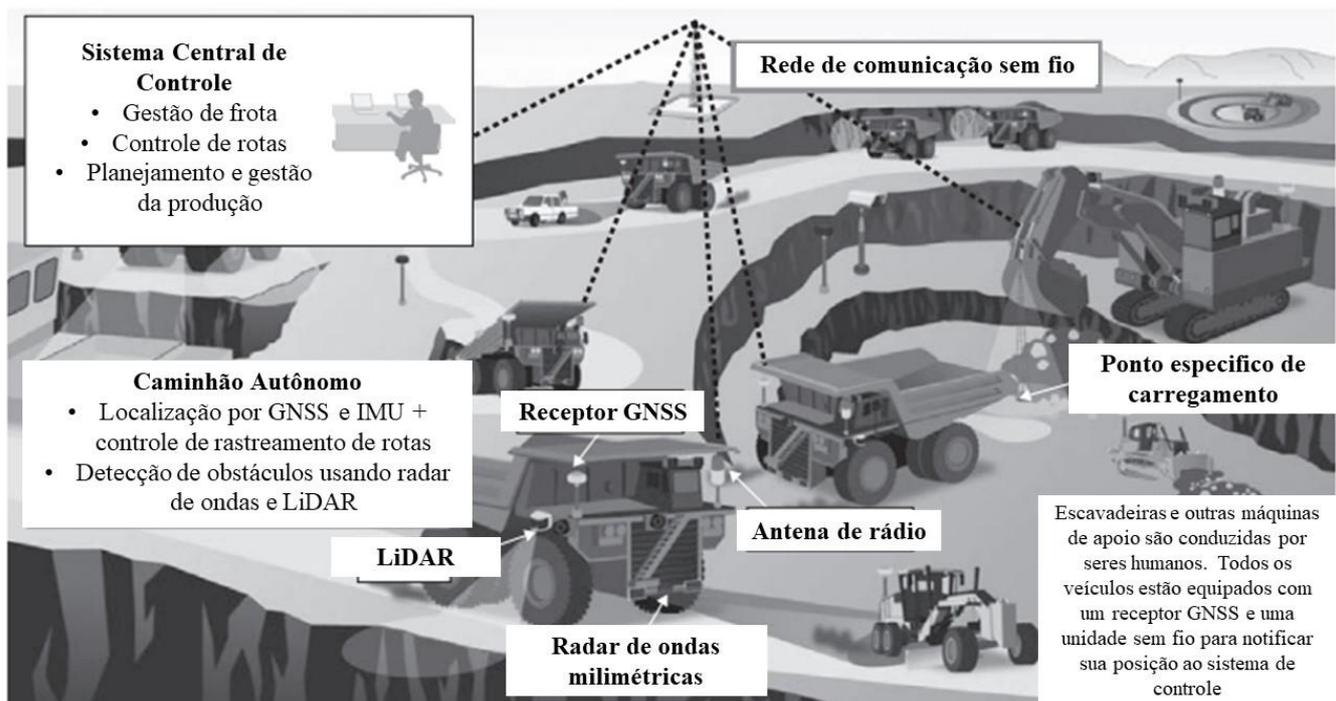
**Energia Elétrica:** a demanda por energia em um sistema autônomo pode ser maior se comparado ao sistema tradicional, é importante que o fabricante leve em consideração essa demanda adicional de energia no projeto. A fonte de energia elétrica deve ser capaz de manter a energia para os sistemas da máquina, a fim de atingir um estado de parada e manter um estado seguro em caso de problemas.

**Posicionamento e Orientação:** Os sistemas de posicionamento e orientação do equipamento autônomo devem ter meios para detectar o *status* do sistema, por exemplo, probabilidade de erro de medição, precisão, resolução. Qualquer problema relacionado a este sistema pode aumentar o risco de colisão entre equipamentos e obstáculos, desta forma é necessário garantir o uso de sistema de posicionamento de alta precisão e sua manutenção.

**Percepção:** o equipamento autônomo deve possuir sistema de percepção de objetos, equipamentos e pessoas, este sistema deve ser capaz de localizar e reconhecer uma característica potencial de interesse, fornecendo informações necessárias para o controle seguro da máquina, sem a necessidade de interação do operador.

**Comunicação e rede:** O sistema autônomo pode depender de forma significativamente das comunicações. Diversos requisitos, como largura da banda, qualidade do sinal, área de cobertura, devem ser observados. O sistema deve manter uma operação segura, no caso de qualquer falha relacionada às comunicações. Na Figura 5 é possível visualizar a operação autônoma de forma geral.

**Figura 5** – Visão geral do sistema autônomo.



Fonte: Adaptado de Hamada e Saito (2018).

## **2.7 - Infraestrutura de mina**

Para garantir o funcionamento do sistema autônomo é necessário avaliar, se a infraestrutura da mina é adequada para esta nova tecnologia, se os riscos são controlados e se as partes interessadas neste projeto de automação estão preparados para essa mudança.

### *2.7.1 Zona de Operação Autônoma (AOZ)*

A zona de operação autônoma (AOZ) é área delimitada para tráfego de caminhões autônomos, ela deve ser bem definida e delimitada para impedir o acesso não autorizado. Portanto, um sistema de gerenciamento de autorização é essencial, pois tem objetivo impedir que pessoas e equipamentos não autorizados e/ou equipados entrem na AOZ, além de impedir que o equipamento autônomo saia da AOZ de forma descontrolada. Além da AOZ deve-se estar atento as estradas da mina, uma vez que um projeto eficiente de estrada e uma infraestrutura desenvolvida são primordiais para a operação do caminhão autônomo. Todos os elementos geométricos devem ser capazes de permitir uma operação segura e garantir boas velocidades de operação para permitir o máximo desempenho do equipamento autônomo (BENLAAJILI; MOUTAOUAKKIL; CHEBAK, 2021).

## **3 - METODOLOGIA DE PESQUISA**

### **3.1 - Natureza e classificação da pesquisa**

Este trabalho com relação a finalidade se classifica como uma pesquisa aplicada, pois envolve estudos e práticas que contribuem para o desenvolvimento de fluxograma de processo para testes de um sistema autônomo de transporte em uma mina a céu aberto.

Classifica-se como uma pesquisa interdisciplinar por relacionar diversas áreas que integram e cooperam entre si. Quanto aos objetivos classifica-se como uma pesquisa explicativa, pois busca encontrar os fundamentos para definição de indicadores em um teste de um sistema autônomo, registrando dados e fatos. Estes são analisados, interpretados, relacionados e identificadas suas causas.

Quanto aos métodos/procedimentos classifica-se como pesquisa:

- Comparativo – comparação entre indicadores no sistema autônomo e tripulado;
- Observacional – observação da operação autônoma em campo a fim de obter-se informações;
- Estudo de caso – análise de atividades a serem realizadas para executar de forma padronizada teste de validação de sistema autônomo para uma mina em específico, levando em consideração suas peculiaridades.

Quanto a abordagem classifica-se como uma pesquisa quali-quantitativa, pois é feito um levantamento das principais causas que impactam os indicadores e relaciona com os dados existentes na frota tradicional. Com relação ao tipo de método empregado neste projeto, é o método hipotético-dedutivo, pois se parte de uma hipótese e busca deduzi-la na verificação dos fatos e fenômenos.

## **3.2 - Procedimentos metodológicos**

### *3.2.1 Planejamento do projeto*

Para a realização do teste é necessária a criação de um projeto e a definição de etapas, incluindo em cada etapa tarefas e estudos a serem executados durante o projeto de testagem da operação autônoma. As etapas são divididas da seguinte forma:

- Etapa 01 - Definição do objetivo e prazo do teste;
- Etapa 02 - Criação de fluxograma de processo para teste de validação de AHS;
- Etapa 03 - Estudo para definição dos indicadores a serem monitorados a partir dos indicadores da frota tripulada;
- Etapa 04 - Levantamento de recursos e implantação da área de teste;
- Etapa 05 - Execução do teste e coleta de dados.

### *3.2.2 Definição do objetivo e prazo do teste*

Através da realização de reuniões semanais na plataforma *Microsoft Teams*® envolvendo fornecedor do caminhão autônomo e equipe multidisciplinar da mina foi possível definir o escopo do teste e prazo a ser desenvolvido. Bem como alinhar expectativas entre partes.

Com relação ao escopo foi formalizado através de contrato todas as premissas adotadas para o teste e estabelecidos o que estava dentro e fora do escopo. Para apresentação do cronograma foi utilizada uma planilha de acompanhamento das atividades através do *Microsoft Excel*® onde a cada semana era apresentado o andamento do projeto.

### 3.2.3 Estudo para definição dos indicadores a serem monitorados

A análise inicial foi realizada envolvendo um levantamento dos indicadores já utilizados na frota tripulada como base para o estudo dos indicadores para os caminhões autônomos, que envolveu:

- Definição do período de análise dos dados históricos da frota tripulada para fins de comparação;
- Garantir a confiabilidade da base de dados que seria utilizada, sendo assim foi necessário criar e monitorar os indicadores de integridade de dados e edições de ciclo;
- Após a garantia de dados confiáveis, foi realizada a análise dos indicadores já utilizados na frota de caminhões tradicionais tripulados no sistema de gerenciamento de frota para base e *benchmarking* do estudo dos caminhões autônomos;
- Levantar as principais paradas operacionais que impactam nas horas ociosas no período definido.

Estas análises foram necessárias para levantamento dos indicadores já utilizados na frota tradicional com objetivo de estabelecer uma correlação com os indicadores que foram propostos para o sistema autônomo de transporte. A partir dos dados levantados foram realizadas discussões acerca das modificações nos indicadores de desempenho entre frota tripulada e autônoma.

### 3.2.4 Definição de uma ferramenta

Foi identificado a necessidade de uma ferramenta que possibilite a consulta da base histórica dos indicadores da frota tripulada. A mina já possui um sistema de gerenciamento de frota que fornece diversos relatórios e a base histórica dos principais indicadores de gestão de

frota, além do acompanhamento em tempo real da operação. Desta forma, definiu-se a utilização do sistema de gerenciamento de frota para análise dos indicadores da frota tripulada.

Para a coleta dos dados da frota autônoma durante os testes foi definida a utilização do sistema de telemetria do caminhão, fornecido pelo fabricante.

#### *3.2.4.1 Levantamento de dados*

Para a frota tripulada os dados foram levantados na base histórica do sistema de gerenciamento de frota. Através do relatório de registro de estados realizou-se o filtro de data inicial, final e a frota em estudo, neste caso caminhões basculas 8X4. Estes dados ficam disponíveis no banco de dados do sistema de gerenciamento de frota selecionado para o estudo.

Para a frota autônoma os dados foram levantados durante os testes que ocorreram de 22 a 26 de maio de 2023 e o banco de dados foi disponibilizado pelo fabricante do equipamento.

#### *3.2.4.2 Tratamento dos dados*

Para o levantamento de dados da frota tripulada foi necessário um filtro no sistema de gerenciamento a fim de obter-se apenas os dados necessários ao projeto, bem como os indicadores selecionados e equipamentos envolvidos no estudo.

Buscando prevenir erros e evitar a manipulação de dados, o sistema de gerenciamento de frota é restrito a alguns perfis de usuários na empresa e solicita para sua consulta um *login* com usuário e senha únicos, sigilosos e intransferíveis, garantindo assim a integridade dos dados. Todos os dados extraídos do sistema foram armazenados e protegidos em rede corporativa a fim de se proteger dados sensíveis.

Como boa parte dos dados do sistema de gerenciamento de frota são inseridos manualmente pelo operador durante a operação, identificou-se a necessidade de criação de um indicador de integridade dos dados e edições manuais de ciclo, afim de medir a qualidade dos apontamentos gerados no sistema e garantir a confiabilidade dos dados utilizados.

Para a integridade dos dados foi utilizado o método dos quartis, metodologia já utilizada na empresa e que foi somente aprimorada através do acompanhamento da coordenação da área junto a sala de controle e operação de mina. Nas edições de ciclo foi criado um projeto para

melhora do indicador, a metodologia adotada foi a de utilização de elementos de jogos para engajamento da equipe.

### 3.2.5 Definição de Premissas

Como parte do escopo definido no planejamento, alguns itens precisaram ser adotados como premissas, sendo eles:

- O teste deveria ser *in loco*, em uma área definida junto ao planejamento de mina, com objetivo de representar a realidade operacional da mina;
- Em função do caminhão ser conceito, seria adotado a figura do *safety driver* durante a operação, que seria disponibilizado pela equipe de operação de mina e treinado pelo fabricante para atuar em caso de emergência.
- A infraestrutura de rede seria desenvolvida em conjunto – fornecedor e empresa;
- O teste não contemplaria automação na etapa de carregamento (escavadeira), apenas no caminhão basculante;
- No teste seria disponibilizado apenas um caminhão cuja operação ficaria restrita a AOZ teste, ou seja, sem interação com os demais caminhões tripulados.

Para delimitar a abrangência do estudo, foram definidas as áreas que seriam analisadas, os parâmetros e indicadores, sendo elas:

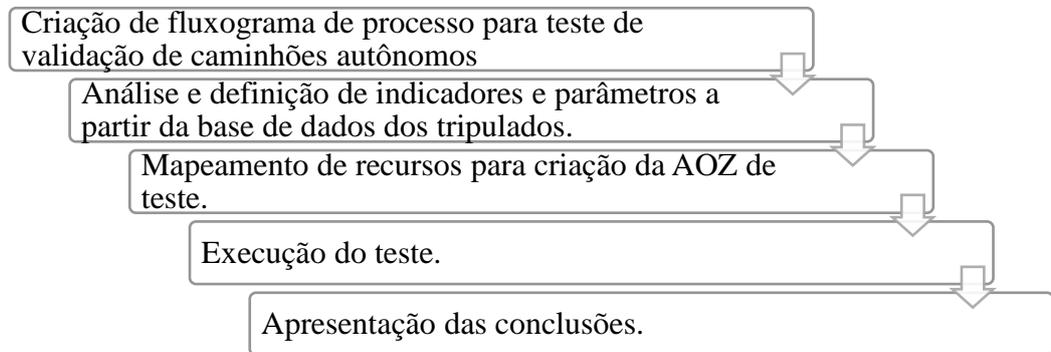
- Manutenção de equipamentos;
- Tecnologia da Informação (redes);
- Gestão de frota.

### 3.2.6 Implantação de AOZ de teste

Além do levantamento de dados para a análise dos indicadores, foi realizado o planejamento e execução de testes com o caminhão autônomo. Os testes tinham intuito de levantar riscos e oportunidades de uma futura implantação do AHS, analisando além dos indicadores e parâmetros, a criação de uma área com infraestrutura adequada para operação autônoma e que representasse a realidade operacional da mina. Para que tudo ocorresse da melhor forma possível foi necessária a criação de um fluxograma de processo com abrangência de todos os processos de mapeamento de indicadores e parâmetros, bem como as ações para

implantação de uma AOZ de teste. A Figura 6 demonstra o fluxo de atividades desenvolvidas para alcance dos objetivos do trabalho.

**Figura 6** – Fluxograma de atividades



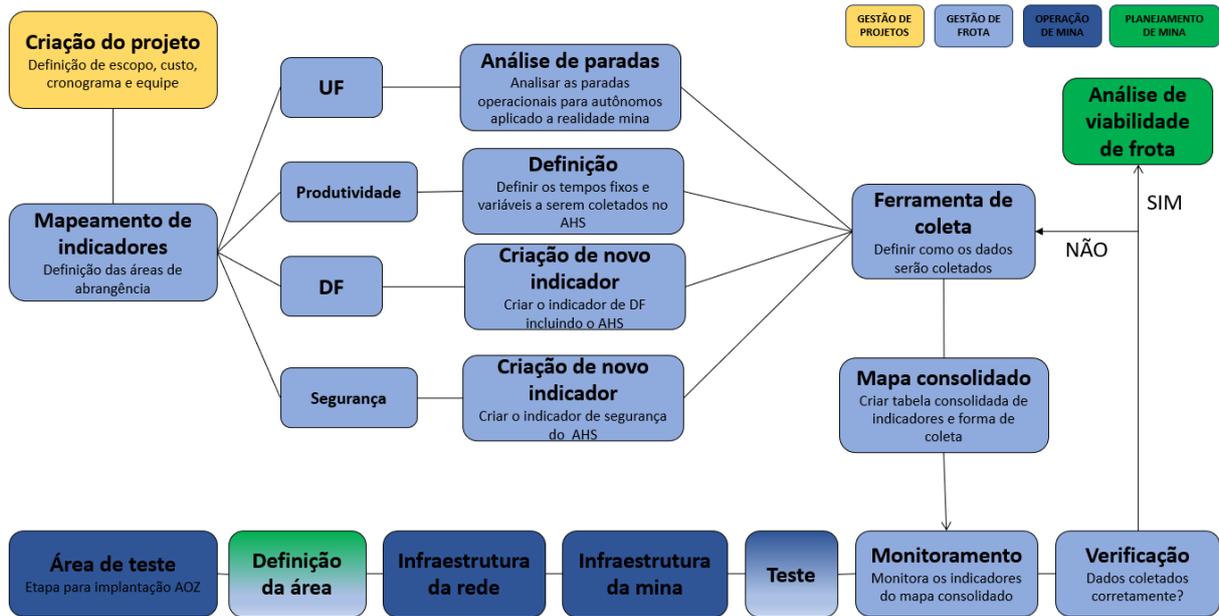
Fonte: Próprio Autor (2023).

## 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 – Fluxograma de processos

Foi identificado pela equipe do projeto que não havia um processo definido para testes de caminhões autônomos, sendo necessário realizar um mapeamento macro do processo. Este fluxograma teve como objetivo direcionar a equipe de projeto em todo processo de teste de validação, desde a análise e definição de indicadores e parâmetros até os requisitos para implantação de uma AOZ, a execução do teste e coleta de dados. Na Figura 7 é apresentado o fluxograma de processo criado para testes de validação de caminhões autônomos em uma mina a céu aberto.

**Figura 7** – Fluxograma de processo para criação de teste de validação



Fonte: Próprio Autor (2023).

Cada cor do fluxograma demonstra a área responsável pela atividade, conforme legenda no canto superior direito do fluxograma. Para as etapas de definição de área e o teste propriamente dito, são etapas que foram compartilhadas as responsabilidades entre as áreas. Na definição de área de teste a equipe de planejamento de mina e gestão de frota tiveram que conciliar plano de lavra e execução do teste em um mesmo ambiente: a mina.

Na etapa de teste, teve-se a maior influência de outras áreas. A equipe de operação de mina, que abrange a infraestrutura e tem responsabilidade por qualquer atividade dentro da mina, teve que estar envolvida em todo o teste, como ponto focal das atividades de apoio e auxílio na disponibilização de recurso, como motoniveladora e caminhão pipa, bem como o operador da escavadeira para carregamento e *safety driver*.

#### 4.2 – Criação do Projeto

O gerenciamento do projeto ocorreu em fases, organizado de forma estruturada e sequencial, o que facilitou o seu gerenciamento e aumentou as chances de sucesso na entrega dos resultados. A divisão ocorreu em 5 fases principais, sendo elas:

#### Iniciação:

- Definição do escopo do projeto.
- Identificação das partes interessadas.
- Elaboração do termo de abertura do projeto.

#### Planejamento:

- Desenvolvimento do plano de projeto.
- Identificação e análise dos riscos.
- Estabelecimento de métricas de desempenho.
- Definição do cronograma detalhado.

#### Execução:

- Implementação do plano de projeto.
- Realização das atividades planejadas.
- Gerenciamento das partes interessadas.
- Monitoramento e controle do trabalho realizado.

#### Monitoramento e Controle:

- Acompanhamento do progresso do projeto.
- Verificação do cumprimento das métricas de desempenho.
- Controle das mudanças no escopo, custo e prazo.

#### Encerramento:

- Entrega do produto final.
- Análise pós-projeto (lições aprendidas).

Em função das especificidades e alterações de cada projeto estas fases podem sofrer ajustes, cada uma delas deve ser disposta em um cronograma macro para acompanhamento.

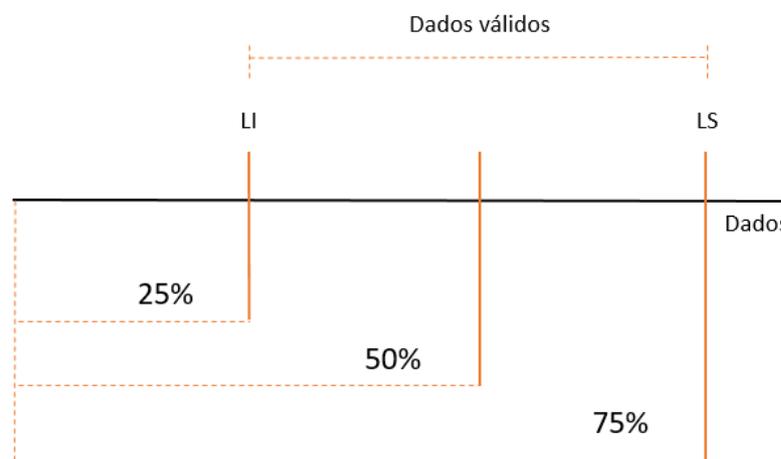
### 4.3 – Mapeamento de parâmetros e indicadores

#### 4.3.1 Garantia da qualidade da base de dados da frota tripulada

Para iniciar o mapeamento dos parâmetros e indicadores a serem utilizados no teste, iniciou-se pelo levantamento dos indicadores que já eram utilizados na frota tripulada. Definiu-se como ferramenta de coleta de dados o sistema de gerenciamento de frota já implantado na mina sendo necessário garantir a qualidade dos dados apontados a fim de evitar-se erros nas discussões posteriores. Desta forma, criou-se o indicador de integridade de dados que utiliza a análise dos dados de ciclos de transportes apontados pelos operadores, criando um limite superior e inferior para os tempos de ciclos, afim de detectar possíveis erros de sistema e apontamentos.

Para cada rota (mesma origem e destino) realizada no sistema são gerados diversos dados de ciclo e então divide-se os dados em quatro grupos, cada um contendo aproximadamente 25% dos dados para análise. O primeiro grupo é o valor que separa os 25% menores valores dos 75% maiores valores. O segundo é igual à mediana, ou seja, divide os dados em duas partes iguais, com 50% dos dados abaixo e 50% dos dados acima desse valor. O terceiro é o valor que separa os 75% menores valores dos 25% maiores valores, conforme exemplificado na Figura 8.

**Figura 8** – Divisão de dados de ciclo de transporte.



Fonte: Próprio Autor (2023).

Definiu-se o limite inferior e superior, respectivamente, em 25% e 75% dos dados. Os dados que não se encontram entre o limite inferior e superior são tratados como desvio, ou seja, são possíveis erros de apontamento ou de sistema que devem ser investigados e tratados a fim de melhorar a qualidade da base de dados para as futuras análises. Como exemplo é possível identificar, através da Tabela I, a análise realizada em uma frente de lavra durante a atividade de formação de pilha.

**Tabela I – Análise de dados.**

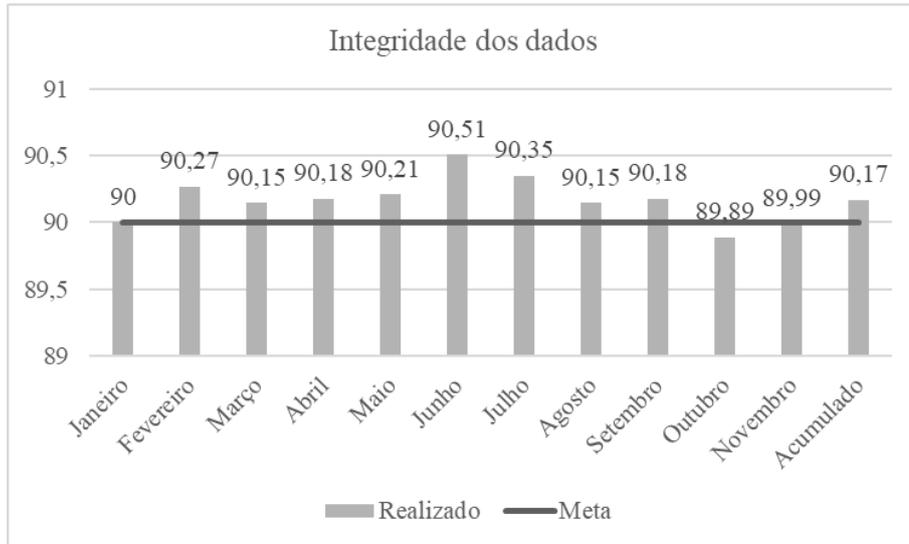
<b>Total de Ciclos</b>	<b>204</b>
<b>Limite inferior (LI) - minutos</b>	<b>11,29</b>
<b>Limite superior (LS) - minutos</b>	<b>25,04</b>
<b>Quantidade Ciclos Válidos (entre LI e LS)</b>	<b>184</b>
<b>Quantidade de Ciclos Inválidos</b>	<b>20</b>
<b>Integridade de dados (%)</b>	<b>90,20</b>

Fonte: Próprio Autor (2023).

Como *benchmarking* adotou-se 90% de meta de integridade de dados, ou seja, somente 10% dos ciclos daquela rota poderiam estar fora dos limites superior e inferior estabelecidos. Garantindo assim a qualidade dos dados de ciclo gerados, que influenciam diretamente na base dados de produtividade de transporte adotada no dimensionamento de frota.

A equipe de gestão de frota acompanhou o indicador durante o ano de 2023, o mês de dezembro não foi contabilizado em função da paralisação das atividades de transporte no período. Através da análise e ações corretivas tomadas junto aos operadores e sala de controle alcançou-se uma média anual de 90,17%, através da Figura 9 é possível verificar o comportamento do indicador de integridade de dados ao longo do ano. Nos meses de outubro e novembro houve uma queda do indicador, a causa identificada foi um erro de atualização do sistema de gerenciamento de frota, sendo tratado junto ao fornecedor e corrigido. Mesmo com o erro não houve prejuízo no acumulado anual do indicador.

**Figura 9 – Integridade dos dados**



Fonte: Próprio Autor (2023).

Os dados gerados pelo sistema de gerenciamento de frota têm influência direta dos operadores, uma vez que diversas informações são lançadas via computador de bordo instalado nas cabines. Como toda ação humana, podem ocorrer erros relacionados a estes apontamentos, e sendo a base de dados gerada pelo sistema utilizada para o dimensionamento de frota, determinação de indicadores de resultado e reporte gerencial, deve-se realizar ações a fim de minimizar estes erros e impactos no processo de tomada de decisão.

A fim de garantir a qualidade dos dados e a menor manipulação possível, a equipe realizou um levantamento da quantidade de ciclos editados pela sala de controle e analista responsável, com o resultado levantado identificou-se a necessidade de melhoria, criando assim um projeto utilizando elementos de jogos junto as equipes de turno com foco na redução de edições de ciclo. O uso de jogos pode ser utilizado no meio corporativo com intuito de engajar o time e gerar resultados de forma lúdica, interativa e criativa.

Através das ações tomadas no projeto e toda metodologia de jogos aplicada, reduziu-se significativamente as edições de ciclo no sistema. Antes do projeto, de janeiro a agosto de 2022, a média de edições de ciclos era de 2.036, nos meses de setembro a novembro de 2022, após as ações do projeto, as edições caíram para 117 ciclos editados em média, uma redução de 78% das edições de ciclo, conforme Figura 10.

**Figura 10** – Edições de ciclo de transporte



Fonte: Próprio Autor (2023).

Com a redução das edições de ciclo garante-se uma menor manipulação dos dados, e consequentemente, uma maior confiabilidade dos dados gerados através do sistema de gerenciamento de frota.

#### 4.3.2 Utilização Física

Com a garantia de uma maior confiabilidade de dados gerados pelo sistema de gerenciamento de frota, através do acompanhamento dos indicadores de integridade de dados e edições de ciclo, iniciou-se o processo pelo indicador de utilização física, realizou-se então o levantamento das principais paradas operacionais que impactam nas horas ociosas da frota de transporte tripulada com objetivo de tê-las como base para o estudo do indicador de UF da frota autônoma. Para esta etapa foram levantadas as paradas operacionais, gerenciáveis ou não gerenciáveis, que impactam nas horas ociosas da frota.

Como o sistema autônomo tem impacto direto nas paradas operacionais, em função da exclusão do fator humano, foi realizado um estudo com objetivo de analisar se as paradas operacionais deveriam ser readequadas para o teste, buscando concluir se a parada seria eliminada, reduzida, aumentada ou não sofrer alteração em um cenário de monitoramento para operação autônoma (AHS). Para isto dividiu-se as paradas operacionais em gerenciáveis e não gerenciáveis. A análise dos códigos foi realizada de acordo com a Tabela II.

**Tabela II** – Comparativo de paradas operacionais.

Categoria	Parada Operacional	Impacto	Observação
Gerenciável	Equipamento Disponível	Sem alteração	Como está parada pode estar ligada a uma definição estratégica, ambos os modelos podem ter a parada.
Gerenciável	Parada Contra o Sono	Eliminada	Como a parada contra o sono está ligada a fadiga do operador, esta poderia ser eliminada no AHS.
Gerenciável	Falta de Operador	Eliminada	No AHS não existe operador ligado diretamente a operação, desta forma não haveriam impactos relacionados a falta de operador
Gerenciável	Troca de Operador	Eliminada	No AHS não existe operador ligado diretamente a operação, desta forma não haveriam impactos relacionados a troca de operadores
Gerenciável	Refeição	Eliminada	No AHS não existe operador ligado diretamente a operação, desta forma não haveriam impactos relacionados a refeição.
Gerenciável	Treinamento/Reunião	Eliminada	No AHS não existe operador ligado diretamente a operação, desta forma não haveriam impactos relacionados a treinamento/reunião.

Gerenciável	Parada Pessoal	Eliminada	A parada pessoal é utilizada para paradas ligadas a necessidades básicas do operador, como ir ao banheiro ou beber água. Sendo assim pode ser eliminada no AHS.
Gerenciável	Troca de Turno	Eliminada	No AHS não existe operador ligado diretamente a operação, desta forma não haveriam impactos relacionados a troca de turno entre operadores.
Gerenciável	Aguardando Acerto De Praça	Sem alteração	Para ambos os sistemas é necessário manter a qualidade de praças e vias, com objetivo de aumento de produtividade. Sendo assim em ambos a parada é mantida.
Gerenciável	Aguardando Equipamento de Carga	Sem alteração	Esta parada depende do equipamento de carga, sendo assim se mantem em ambos os sistemas.
Gerenciável	Lavando Implementos	Sem alteração	A limpeza de implementos pode estar ligada ao tipo de material ou umidade, sendo assim ambos os sistemas podem ser impactados.
Gerenciável	Manutenção de periféricos	Sem alteração	Esta parada é utilizada para manutenção de tecnologia embarcada, como são utilizados sistemas que independem do AHS, sugere-se manter esta parada para os demais sistemas e a criação de um novo somente para manutenção do AHS a fim de mensurar separadamente.

Gerenciável	Aguardando Topografia	Sem alteração	Está parada ocorre em função de segurança da equipe de topografia que necessitar adentrar na praça de trabalho para conferência de piso e marcação, em ambos os sistemas os equipamentos devem permanecer parados enquanto a equipe esteja em campo.
Gerenciável	Indisponibilidade da Praça de Descarga	Sem alteração	A indisponibilidade da praça de descarga, como por exemplo uma pilha de estéril ou pilha de estoque, pode ocorrer para ambos os sistemas.
Gerenciável	Exames Médicos Periódicos	Eliminada	No AHS não existe operador ligado diretamente a operação, desta forma não haveriam impactos relacionados a exames médicos periódicos.
Gerenciável	Poeira	Sem alteração	O excesso de poeira altera a visibilidade do operador no sistema tripulado e poderia causar paradas por falsos obstáculos no AHS, além disso a poeira é também um fator ambiental, sendo necessária a parada para mitigação do problema e impactando ambos os sistemas.
Gerenciável	Falta Equipamento Carga	Sem alteração	Está parada depende do equipamento de carga, sendo assim se mantem em ambos os sistemas.
Gerenciável	Aguardando limpeza do Ponto de Alimentação	Sem alteração	Esta parada esta relacionada somente ao ponto de descarregamento do minério, sendo assim se mantem em ambos os sistemas.

Não gerenciável	Atolamento	Sem alteração	Atolamento esta relacionado em sua maioria as condições climáticas e de acesso, podendo ocorrer em ambos os sistemas.
Não gerenciável	Manutenção do Ponto de Alimentação	Sem alteração	Esta parada esta relacionada somente ao ponto de descarregamento do minério, sendo assim se mantem em ambos os sistemas.
Não gerenciável	Fatores Climáticos	Sem alteração	Em alguns casos este item pode ser diminuído no AHS pela retirada dos operadores do risco, porém pode ainda ocorrer algum dano material proveniente de um acidente por deslizamento, escorregamento, etc. por isso foi mantido sem alteração.
Não gerenciável	Aguardando Abastecimento	Sem alteração	Esta parada depende do caminhão de abastecimento, sendo assim ambos os sistemas podem ter esta parada.
Não gerenciável	Emergência	Sem alteração	Em uma possível emergência, as operações podem ser paralisadas como um todo, sendo assim ambos os sistemas podem ter esta parada.
Não gerenciável	Aguardando Equipamento de Infraestrutura	Sem alteração	Esta parada depende da equipe/equipamento de infraestrutura, sendo assim ambos os sistemas podem ter esta parada.
Não gerenciável	Acesso interrompido	Sem alteração	Um possível interrompimento de acesso pode ocorrer e paralisar ambos os sistemas, sendo assim deve ser mantido sem alteração.

As análises com relação as paradas operacionais estão relacionadas a realidade operacional da mina do estudo. Elas podem variar de mina para mina, sendo assim o estudo do impacto das horas ociosas e paradas operacionais deve ser realizado para cada cenário considerando as peculiaridades de cada mina. O importante é partir da lista de paradas operacionais já cadastradas no sistema de gerenciamento de frota, se houver, ou criar uma nova lista pensando nas paradas possíveis durante a operação autônoma.

Através da análise dos códigos de parada já existentes foi possível verificar que alguns podem ser eliminados para o teste do autônomo, visto que estes não ocorreriam. Sendo eles:

- Parada contra o sono;
- Refeição;
- Falta de operador;
- Troca de operador;
- Treinamento/Reunião;
- Parada pessoal;
- Troca de turno;
- Exames médicos periódicos.

Além da análise dos códigos existentes, através de uma reunião de *brainstorming* entre operação de mina, fabricante do caminhão autônomo e gestão de frota, foram definidos novos códigos de parada que devem ser inseridos no monitoramento classificados na categoria AHS, conforme Tabela III abaixo.

**Tabela III** – Impactos nas paradas operacionais.

Categoria	Parada Operacional	Impacto	Observação
AHS	Detecção de falso obstáculo	Criação	Em função da configuração de parada imediata do sistema AHS ao detectar objetos/pessoas na via, podem ocorrer paradas por falsos objetos/pessoas em função da má visibilidade ou erro de software.
AHS	Falta ou perda de sinal GNSS	Criação	No AHS existe uma dependência de sinal GNSS para que o equipamento opere, sendo assim se o sistema está sem sinal não é possível operar.
AHS	Falta ou perda de sinal wireless	Criação	Assim como no GNSS existe também uma dependência de sinal <i>wireless</i> para que o equipamento comunique com a sala de controle e receba os comandos de operação, sendo assim se o sistema está sem sinal wireless não é possível operar.

Com a exclusão de oito paradas operacionais para o teste do autônomo, foi possível quantificar o impacto gerado na UF, somente nesta primeira análise. Para isto foi realizado um levantamento das horas, por caminhão, no período janeiro a novembro de 2023 através do relatório de registro de estados no sistema de gerenciamento de frota, obteve-se os seguintes resultados, conforme Tabela IV.

**Tabela IV** – Levantamento de horas de parada ano dos caminhões tripulados.

Parada Operacional	HO	% na UF
Parada Contra o Sono	36,94	0,42%
Falta de Operador	127,32	1,45%
Troca de Operador	5,78	0,07%
Refeição	509,47	5,82%
Treinamento/Reunião	21,84	0,25%
Parada Pessoal	6,71	0,08%
Troca de Turno	223,60	2,55%
Exames Médicos periódicos	4,67	0,05%
Total		10,69%

Realizado o levantamento de horas em cada uma das paradas, foi possível quantificar os ganhos em porcentagem de cada uma das paradas em relação a UF. Levantando assim um ganho de 10,69% na UF considerando a eliminação das paradas operacionais listadas na Tabela IV para um futuro dimensionamento da frota autônoma. Quando comparada ao sistema tripulado onde utiliza-se, também com base no banco de dados, uma UF de 76%, tem-se então definidas as UF para cada um dos cenários:

- Sistema Tripulado – 76,00%
- Sistema Autônomo – 86,69% (ganho de 10,69%)

Desta forma, pode-se concluir que o indicador de UF tem papel fundamental na análise de viabilidade de caminhões autônomos e deve ser monitorado no teste de validação, porém como a UF é baseada nas paradas operacionais, estas devem ser analisadas uma a uma de modo

a concluir se a parada pode ser eliminada ou se não forem suficientes, devem ser criadas novas paradas. Na análise deste trabalho foram retiradas oito paradas e criadas outras três para monitoramento do caminhão autônomo, além da alteração da árvore de horas para o teste.

Um ponto importante é que no sistema tripulado os dados de entrada das paradas operacionais são apontados pelos operadores através de um monitor embarcado do sistema de gerenciamento de frota. Já no caminhão autônomo, como não se tem o operador para desempenhar esta função e algumas delas não podem ser coletadas via telemetria remota, foi criado um perfil de monitoramento no próprio *software* de automação do fabricante, onde pudessem ser apontadas as paradas durante o teste.

#### 4.3.3 Disponibilidade Física

O sistema autônomo pela natureza da tecnologia traz consigo uma gama de informações coletadas, por exemplo telemetria, nas quais os caminhões tripulados possam não ter, possibilitando uma análise de falha mais detalhada.

Apesar dos ganhos esperados, na DF temos acréscimo de uma nova variável: a manutenção ocasionada pela quebra ou parada do AHS. Em função disto, mapeou-se a necessidade de segregação das manutenções referentes ao caminhão propriamente dito, que já eram monitoradas pelo sistema de gerenciamento de frota e setor de manutenção de equipamentos móveis da mina onde foram realizados os testes, e as manutenções referentes ao sistema autônomo, que até então não eram monitoradas. O valor informado pela manutenção de equipamentos móveis varia mês a mês em função das condições operacionais na mina em questão, substituição de frota e paradas de manutenção. Conforme Figura 11 verifica-se a distribuição mensal da DF que já era monitorada e refere-se apenas a disponibilidade do caminhão tripulado e não do sistema autônomo.

**Figura 11** – Exemplo de distribuição mensal de DF do caminhão

JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
84,13%	83,79%	82,02%	84,42%	82,04%	85,50%	85,53%	85,81%	85,74%	85,57%	83,99%	79,41%

Fonte: Próprio Autor (2023).

Porém para um cenário de mapeamento de indicadores para teste do caminhão autônomo, além do monitoramento da disponibilidade do caminhão, tem-se o acréscimo de uma

nova variável dentro do monitoramento da DF, as horas de manutenção referentes ao sistema autônomo ( $HM_{AHS}$ ), incluindo *hardware e software*. Estas horas precisam ser monitoradas durante o teste, pois num possível impacto de baixa disponibilidade é necessário identificar se o problema está no caminhão ou no AHS. Em função disso foi necessária a criação de um novo indicador, chamado de  $DF_{AHS}$ , que leva em consideração não apenas as horas de manutenção do caminhão, como também do sistema AHS, conforme demonstrado na Equação 4.

$$DF_{AHS} = \frac{HC - HM - HM_{AHS}}{HC} \times 100 \quad [4]$$

Onde:

- $DF_{AHS}$  é a disponibilidade física do conjunto caminhão e sistema autônomo representada pela percentagem do tempo que o equipamento fica disponível para operar;
- HC corresponde às horas calendário que são calculadas por ano, mês ou dia, a depender do horizonte analisado;
- HM corresponde às horas que o equipamento fica indisponível para operação em função de manutenção corretiva, preventiva ou preditiva.
- $HM_{AHS}$  corresponde às horas que o equipamento fica indisponível para operação em função de manutenção corretiva, preventiva ou preditiva do sistema AHS.
- Por consequência da criação de uma nova categoria de HM, chamada de  $HM_{AHS}$  será necessária a alteração da árvore de horas, assim como na UF, incluindo este novo item.

#### 4.3.4 Indicadores de Produtividade

Para a produtividade, da mesma forma que a DF e UF, espera-se um impacto em relação a operação autônoma. Porém, da mesma forma, cabe uma análise de indicadores e a definição se os dados seriam coletados através do *software* de automação ou telemetria durante o teste.

Os tempos que compõem a produtividade podem ser divididos em fixos e variáveis, conforme Equação 3 apresentada no capítulo 2.4.4, onde o tempo variável é a parte em função de velocidade e DMT e os demais são os tempos fixos, realizou-se um levantamento dos tempos fixos de ciclo já praticados no sistema tripulado primeiramente. Estes tempos são calculados a

partir do apontamento do operador do início e fim de cada etapa do ciclo, através do computador embarcado no caminhão. Para levantamento dos tempos fixos, velocidades e, conseqüentemente, cálculo de produtividade consultou-se a base de dados do sistema de gerenciamento de frota tripulada através do relatório de movimentação detalhada de transporte. Esta consulta não teve objetivo de comparar sistema tripulado e autônomo, mas dar base para verificar se teria alguma modificação na forma de cálculo ou método de coleta destes tempos e indicadores.

Os tempos fixos foram calculados a partir de média simples no banco de dados, pois não possuem variação conforme DMT. Já os tempos variáveis, neste caso tempo deslocando carregado e tempo deslocando vazio, tem interferência direta da DMT e são calculados a partir de uma equação que correlaciona a velocidade média e DMT para que se chegue no tempo. Somando tempos fixos e variáveis obtém-se o tempo de ciclo total. A partir do tempo de ciclo total, juntamente com a carga média em toneladas é possível calcular a produtividade horária para cada faixa de DMT.

Analisando os dados de ciclo e produtividade foi verificado que não existe necessidade de alteração ou criação de novos indicadores para o teste, porém foi identificado que para coleta dos dados no sistema autônomo, uma vez que não existe operador para apontar o início e fim de cada uma das etapas do ciclo, seria necessária uma nova ferramenta de coleta, que poderia ser via *software* ou telemetria do sistema autônomo. Porém, por se tratar de uma configuração do sistema autônomo do fabricante, o item foi repassado a equipe de projeto para as devidas providências.

#### 4.3.5 Indicadores de Segurança

Um fator importante na operação autônoma e tripulada é a segurança de todo o processo, e não poderia ser diferente no ambiente de testes. Sendo assim, como não existiam indicadores de segurança envolvendo operação autônoma, todos os indicadores relacionados ao tema tiveram de ser criados, estes indicadores foram levantados e validados com o fabricante do equipamento, operação de mina, gestão de frota e segurança do trabalho.

Os indicadores de segurança devem envolver tanto a capacidade do caminhão autônomo de agir em função de uma situação insegura, bem como monitorar possíveis erros de invasão

da área restrita, neste caso a AOZ de teste. A partir do levantamento foram criados três indicadores envolvendo segurança, sendo eles:

- **Tempo de detecção de obstáculo** - este indicador mede quantos segundos leva do aparecimento de um objeto/pessoa pela câmera frontal até a identificação por inteligência artificial de que objeto se trata de um obstáculo real. Quanto menor este tempo, melhor é o nível de inteligência artificial do equipamento autônomo e maior a segurança em caso de um incidente. Este indicador será coletado a partir do *software* de automação.
- **Tempo de reação ao obstáculo** – este indicador mede quantos segundos leva da confirmação de detecção de um objeto/pessoa até a completa parada do equipamento. Quanto menor este tempo, melhor é a integração entre sistema autônomo e sistema mecânico do equipamento autônomo e maior é a segurança em caso de um incidente. Este indicador será coletado a partir do *software* de automação e telemetria do fabricante.
- **Aderência ao limite de velocidade** – este indicador mede em porcentagem o quão aderente o caminhão autônomo foi ao limite de velocidade da mina inserido como parâmetro no sistema. A velocidade máxima que o caminhão pode operar pode variar em determinados trechos da mina, apesar de buscar sempre uma velocidade maior para melhoria de produtividade, o caminhão autônomo deve ser capaz de respeitar a velocidade informada no sistema em caso de área controlada, piso escorregadio ou emergência. Lembrando que na operação tripulada o descumprimento desta regra é cabível de medidas administrativas ao operador, sendo um importante item envolvendo a segurança da operação.

Vale lembrar que além dos indicadores de segurança, todos os requisitos previstos na ABNT NBR ISO 17757:2022 devem ser cumpridos com objetivo de manter a operação autônoma segura.

#### 4.3.6 Indicadores específicos do teste

Conforme informado anteriormente, uma das premissas estabelecidas pela equipe do projeto era manter um operador apostado na cabine caso fosse necessária uma intervenção por motivos de segurança, este operador foi intitulado de *safety driver* e tinha como papel assumir

o controle do equipamento em caso de acidente eminente. Para assumir o controle do caminhão bastava um toque em qualquer um dos pedais. Para medir a quantidade de eventos de intervenção criou-se para o teste o indicador de eventos de intervenção do *safety driver*, este indicador era reportado via rádio de comunicação pelo próprio *safety driver*. Para referência para futuras parametrizações e indicadores para validação de áreas de teste este indicador pode também ser usado se a equipe julgar necessário, porém este item trata-se de um requisito exclusivo do projeto.

#### **4.4 – Consolidado de indicadores**

Realizado a análise de definição dos indicadores e parâmetros a serem utilizados no teste do caminhão autônomo, obteve-se um mapa consolidado para fácil consulta e entendimento da equipe. Este consolidado foi utilizado na etapa de teste e verificado se a coleta de dados foi satisfatória durante o teste, o mapa é apresentado na Tabela V.

**Tabela V** – Tabela consolidada de indicadores.

Indicador de origem	Indicador/Parâmetro	Ferramenta de Coleta	Observação
UF	Detecção de falso obstáculo	Software do AHS	Em função da configuração de parada imediata do sistema AHS ao detectar objetos/pessoas na via, podem ocorrer paradas por falsos objetos/pessoas em função da má visibilidade ou erro de software.
UF	Falta ou perda de sinal GNSS	Software do AHS	No AHS existe uma dependência de sinal GNSS para que o equipamento opere, sendo assim se o sistema está sem sinal não é possível operar.
UF	Falta ou perda de sinal wireless	Software do AHS	Assim como no GNSS existe também uma dependência de sinal wireless para que o equipamento comunique com a sala de controle e receba os comandos de operação, sendo assim se o sistema está sem sinal wireless não é possível operar.
DF	DF <sub>AHS</sub>	Sala de controle	Novo indicador de DF levando em consideração as horas de manutenção referentes ao AHS
Produtividade	Tempos fixos e variáveis	Telemetria/Software do AHS	Para o indicador de produtividade não houve alteração, porém como a ferramenta de coleta se diferencia do sistema tripulado este indicador deve ser acompanhado em teste.

Segurança	Tempo de detecção de obstáculo	Software do AHS	Indicador para medir o tempo que o AHS leva do aparecimento de um objeto/pessoa pela câmera frontal até a identificação por inteligência artificial de que objeto se trata de um obstáculo real.
Segurança	Tempo de reação ao obstáculo	Software do AHS	Indicador para medir o tempo desde a confirmação de detecção de um objeto/pessoa até a completa parada do equipamento.
Segurança	Aderência ao limite de velocidade	Software do AHS	Indicador para medir o quão aderente o caminhão autônomo foi ao limite de velocidade da mina inserido como parâmetro no sistema
Outros	Eventos de intervenção do <i>safety driver</i>	Software do AHS	Indicador específico do teste, para medir o número de intervenções que o <i>safety driver</i> teve de realizar

## 4.4 – Implantação de AOZ de teste

### 4.4.1 Definição da área de teste

Para definição da área de teste foi feito um alinhamento junto ao planejamento de mina de modo a mapear as possíveis áreas disponíveis com as seguintes características e justificativas:

- Sem interferências com o plano anual de lavra – como a AOZ de teste deveria ser restrita a circulação de qualquer equipamento que não estivesse ligado ao projeto, esta área não poderia ter atividade de lavra no período de teste;
- Representar ao máximo a realidade da mina – como a área de teste busca reproduzir as condições operacionais para maior representatividade dos dados, era necessário que a área tivesse declive, aclive e plano, material para carregamento do caminhão e área útil para basculamento do material em pilha.
- Vista para a região do mirante – em função de cobertura de rede, a região deveria ter vista para o mirante da mina onde era possível alimentação elétrica e cabeamento da rede de comunicação do projeto.

Definidos os requisitos da área foi definida pela equipe a área de teste que atendia todos os requisitos, conforme Figura 12.

**Figura 12** – Imagem área da AOZ de teste



Fonte: Adaptado do Google Earth Pro (2023).

#### 4.4.2 Infraestrutura de rede

Um dos principais requisitos para a operação de um caminhão autônomo é a qualidade de rede. Para o teste foram levantadas três possibilidades de rede que poderiam ser utilizadas na AOZ de teste, listadas abaixo:

- Utilização da rede *Wi-fi* local da mina, já implementada através de estações móveis com *access points* espalhadas e infraestrutura Cisco e utilizada para transferência de dados do sistema de fadiga e gerenciamento de frota, na Figura 13 observa-se um *access point* instalado em uma escavadeira para expansão de sinal da mina.

**Figura 13** – Imagem de *access point* da rede *wi-fi* da mina



Fonte: Próprio Autor (2023).

- Utilização da rede LTE privada, porém o custo mesmo para o período de teste era muito alto;
- Utilização de internet via satélite;

Apesar da rede *Wi-fi* ser uma tecnologia de comunicação sem fio que possui uma alta confiabilidade, facilidade de uso e sem a necessidade de cabos, possui a velocidade e a estabilidade da conexão afetadas pela distância do dispositivo ao roteador e por interferências de outros dispositivos ou obstáculos físicos na mina.

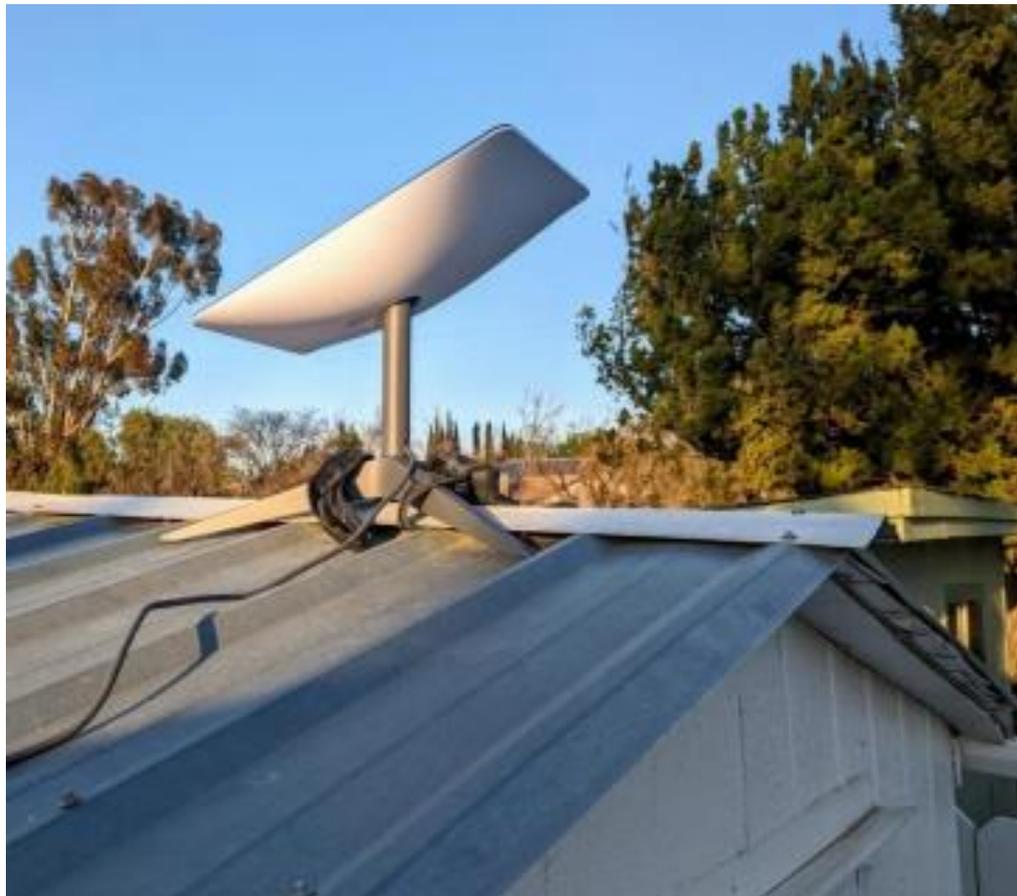
O LTE, ou *Long Term Evolution*, possui alta velocidade que permite o acesso à internet por meio de redes de telefonia móvel. Uma de suas principais vantagens é a alta velocidade de conexão, que pode ser comparável à de redes fixas, como o *Wi-fi*. No entanto, o LTE pode ser mais caro do que o *Wi-fi* em termos de planos de dados e custos de equipamentos.

A internet via satélite é uma tecnologia que permite o acesso à internet por meio de sinais de satélite. Ela oferece uma ampla cobertura geográfica e é uma opção viável para áreas

remotas onde outras formas de acesso à internet não estão disponíveis. No entanto, a internet via satélite tende a ser mais cara do que o *Wi-fi* e o LTE, tanto em termos de custo inicial quanto de planos de dados. Além disso, a latência pode ser um problema, já que os sinais precisam viajar até o satélite e de volta à Terra, o que pode resultar em atrasos na transmissão de dados.

Em resumo, cada tecnologia tem suas vantagens e desvantagens em termos de praticidade, velocidade, cobertura e custo. A escolha da melhor opção para o teste foi baseada em estudos de custo e viabilidade realizados pela equipe de redes, foi definido então a utilização da internet via satélite em função da cobertura superior a rede *wi-fi* da mina, além do menor custo quando comparada a LTE privada em função da necessidade de apenas uma antena para cobertura. A antena e toda estrutura necessária foi instalada no mirante da mina, no qual havia visibilidade e gerou menor sombra na AOZ de teste. Em um cenário de operação definitiva e implantação de autônomos, cabe uma nova análise de cobertura, latência e custo. Na Figura 14 é possível verificar o modelo de antena utilizada.

**Figura 14** – Imagem da antena instalada



Fonte: Acervo do fabricante (2023).

Definida a rede a ser utilizada foi realizado um mapeamento na área definida para AOZ de teste com objetivo de mapear possíveis áreas de sombra de sinal e que poderiam impedir a operação do caminhão autônomo, para este mapeamento foi instalado um kit do fabricante que funcionava como uma antena do caminhão autônomo para coleta de dados, na Figura 15 é possível observar o kit de mapeamento instalado em veículo leve para mapeamento.

**Figura 15** – Mapeamento da qualidade da rede na AOZ de teste



Fonte: Próprio Autor (2023).

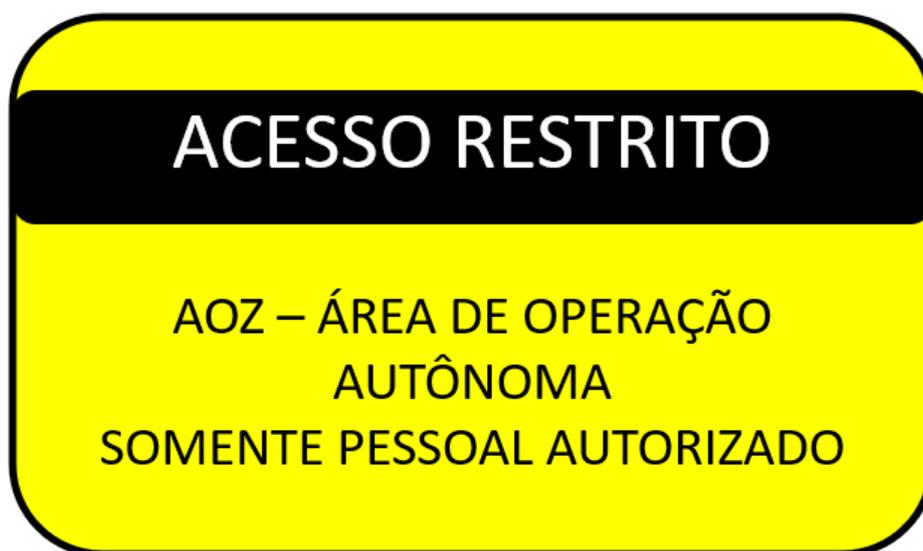
#### *4.4.3 Infraestrutura de mina e sinalização*

Conforme levantado na etapa de revisão bibliográfica é necessário a delimitação de uma área com acesso controlado, onde adentrem apenas equipamentos com tecnologia embarcada capaz de serem visualizados pelo equipamento autônomo, com objetivo de evitar acidentes e paradas desnecessárias por detecções de obstáculos. A infraestrutura de mina envolvida no teste está basicamente ligada aos itens de limitação física da AOZ de teste e sinalização.

Para restringir a AOZ de teste foi confeccionada leira de proteção em todas as possíveis entradas da área, com objetivo de impedir a entrada de outros equipamentos e pessoas. Esta atividade foi realizada com apoio da escavadeira de 20t disponível para as operações auxiliares, a altura da leira foi mantida com o padrão da NR-22 já executado na mina.

Para a sinalização, foi confeccionada placa de alerta na cor amarela, com objetivo de sinalizar as pessoas que circulam na área da mina de que área possui operação autônoma e a entrada é restrita. O modelo de placa utilizado é demonstrado na Figura 16.

**Figura 16** – Placa de sinalização da AOZ de teste



Fonte: Próprio Autor (2023).

Atividades auxiliares como manutenção de acesso e umidificação de vias também foram executadas na AOZ de teste, porém estas atividades eram programadas em momentos em que os testes não estavam ocorrendo em função do caminhão pipa e motoniveladora não estarem equipados com o sistema de geoposicionamento para entrada na AOZ durante a operação do caminhão.

#### *4.4.4 Requisitos de segurança*

Alguns requisitos de segurança foram adotados em atendimento a ABNT NBR ISO 17757:2022. Um deles foi o indicador visual para distinção do modo autônomo e manual, onde quando o caminhão estivesse operando em modo autônomo este deveria ter um sinal luminoso

visível na cor azul, quando em operação manual esta luz deve estar verde. Estes itens foram passados para o fabricante que disponibilizou o caminhão já com este indicador de fábrica.

#### 4.5 – Execução de Teste

Após o cumprimento das etapas de mapeamento de indicadores, parâmetros e criação da AOZ previstas no fluxograma de processo do projeto, seguiu-se para a etapa de teste com objetivo de monitorar e coletar dados através de um teste real na AOZ com um caminhão autônomo.

Para o teste foi utilizado um caminhão rodoviário fornecido pelo fabricante, já com a tecnologia autônoma embarcada. Na Figura 17 é possível identificar os principais componentes do caminhão autônomo disponibilizado para o teste.

**Figura 17** – Componentes do caminhão autônomo



Fonte: Próprio Autor (2023).

O tempo desde a chegada do equipamento autônomo até a finalização do teste de validação foi de cerca de seis dias, sendo que os primeiros três dias foram de reconhecimento da área pela equipe de *software* e engenharia do caminhão, este reconhecimento incluiu uma etapa denominada *machine learning*. Esta etapa é fundamental para o teste de validação, uma vez propicia a coleta de dados em campo para que o algoritmo utilizado na inteligência artificial melhore sua precisão. Ideal é que esta etapa seja executada na própria AOZ de teste, uma vez que os dados coletados são realmente da área de operação.

Após etapa de *machine learning* foi realizado um evento de lançamento do teste, com a presença da equipe do projeto, alta direção e demais áreas envolvidas. O teste ficou restrito ao horário de trabalho do administrativo da mina, por isso a duração do teste teve seu tempo reduzido. No total foram 16 h de coleta de dados, onde foi possível realizar diversos ciclos de transporte, incluindo todas as etapas de ciclo. Na tabela VI tem-se o resultado da coleta de dados, em busca dos indicadores mapeados.

**Tabela VI – Tabela de resultados do teste.**

Indicador de origem	Indicador/Parâmetro	Ferramenta de Coleta	Unidade	Resultado
UF	Detecção de falso obstáculo	Software do AHS	unidade	NA
UF	Falta ou perda de sinal GNSS	Software do AHS	h	0
UF	Falta ou perda de sinal wireless	Software do AHS	h	0
DF	DF <sub>AHS</sub>	Sala de controle	h	0
Produtividade	Velocidade média	Telemetria/Software do AHS	km/h	14,4
Produtividade	Tempo médio de ciclo	Telemetria/Software do AHS	Minutos	4,6
Produtividade	Tempo total em basculamento	Telemetria/Software do AHS	h	2,72
Segurança	Tempo de detecção de obstáculo	Software do AHS	segundos	NA
Segurança	Tempo de reação ao obstáculo	Software do AHS	segundos	NA
Segurança	Aderência ao limite de velocidade	Software do AHS	%	100
Outros	Eventos de intervenção do <i>safety driver</i>	Software do AHS	unidade	1

Através da análise dos resultados coletados foi possível identificar diversos pontos de melhoria, que podem ser listados abaixo:

- Os indicadores de detecção de falso obstáculo, bem como os tempos de reação e detecção devem ser melhor mapeados, pois não ocorreram eventos desta natureza durante o teste;
- Os dados referentes ao ciclo e velocidade média ainda precisam ser melhor trabalhados no sistema AHS, pois o sistema não foi capaz de separar o tempo de cada etapa do ciclo de transporte, apenas no basculamento onde ele somou todas as horas. A velocidade média foi geral, contabilizando o tempo de basculamento

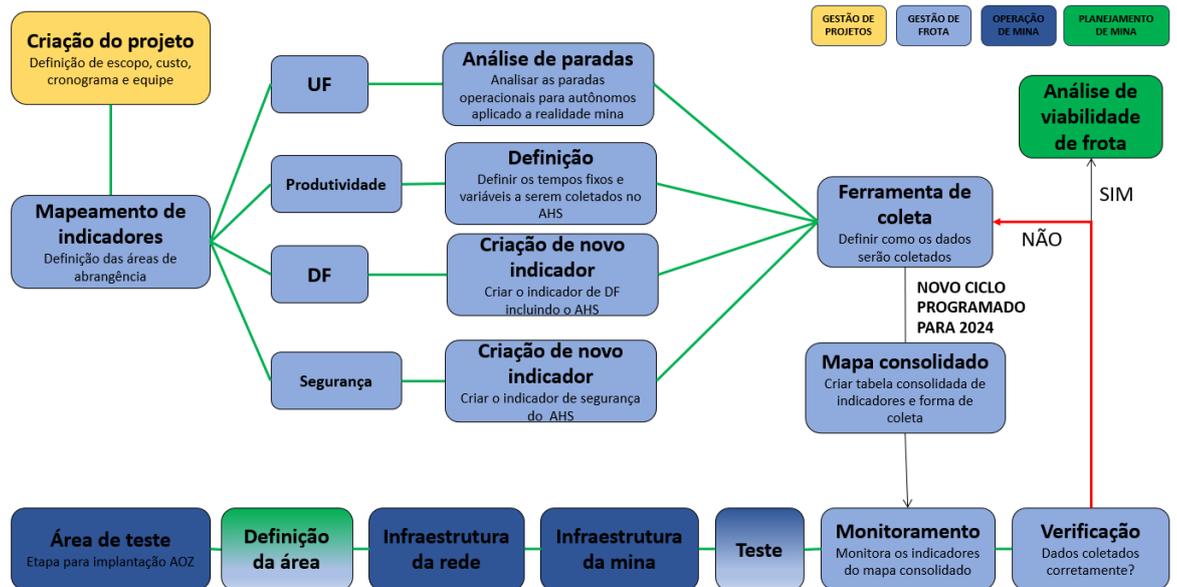
e carregamento o que acaba por penalizar a velocidade, o que em uma análise de viabilidade poderia inviabilizar a implantação de caminhões autônomos por um erro no cálculo da velocidade média. O ideal seria separar apenas a velocidade média durante a etapa operando vazio e operando cheio, como é feito no sistema tripulado.

- A falta ou perda de sinal *wireless* foi um grande problema durante o teste, apesar das 16 h de execução de teste sem problemas deste tipo, o teste poderia ter sido estendido se não fosse um problema ocasionado pela latência no sinal *wireless*. Este problema ocasionando o cancelamento do teste e não permitiu maior coleta de dados. Por isso, apesar do quantitativo de horas referente a este item estar zerado, ele foi o causador da paralisação do teste. Este item reforça ainda mais a necessidade de infraestrutura de rede robusta para operação autônoma.

Com o teste executado e os dados coletados foi possível visitar o fluxograma de processos e identificar melhorias nas ferramentas de coleta de dados. Estas melhorias foram repassadas ao fabricante em reunião e são alvo de melhoria na segunda etapa de testes que podem ocorrer posteriormente.

Os dados coletados não puderam seguir para etapa posterior, prevista no fluxograma de processos, que era alimentar a análise de viabilidade de frota, conforme o próprio fluxograma se a coleta de dados não for corretamente executada deve-se revisar a etapa de determinação de ferramenta de coleta com objetivo de corrigir os erros, ou seja, enquanto houver erros o fluxograma deve ser revisado, conforme literatura, conforme Figura 18.

**Figura 18** – Análise do fluxograma de processo após o teste



Fonte: Próprio Autor (2023).

Onde o fluxo mapeado em verde foi executado, sendo necessário novo ciclo de monitoramento para correção da ferramenta de coleta de dados.

#### 4.6 – Ganhos levantados com o projeto

Com aplicação do fluxograma e execução das etapas para o teste de validação puderam ser observados durante o projeto, podendo-se listar:

- Fluxograma de processos para auxiliar em testes de validação de caminhões autônomos no futuro – o fluxograma de processos para testes de validação não só auxiliou neste teste, como auxiliará a equipe de projetos na condução de testes de validação de autônomos no futuro, além de poder auxiliar demais minas que queiram realizar provas de conceito envolvendo autônomos em suas operações;
- Aumento da maturidade no uso do sistema de gerenciamento de frota - como a confiabilidade dos dados gerados pelo sistema de gerenciamento de frota teve de ser mantida alta para uso dos dados no projeto, foi necessário a criação de dois importantes indicadores: integridade de dados e edições de ciclo. Estes trouxeram maior maturidade para a equipe da sala de controle, operadores e todos os envolvidos no processo;

- Engajamento da equipe de infraestrutura, tecnologia e operação – o teste do caminhão autônomo envolveu diversas áreas da empresa que teve que garantir sinergia para que o teste ocorresse da melhor forma possível;
- Avanço no estudo de ampliação e melhoria da rede de comunicação da mina – como o caminhão autônomo exige uma rede de comunicação confiável, estável e de qualidade, foram feitos esforços junto ao time de tecnologia da informação para buscar soluções na área de comunicação da mina, trazendo avanços nas opções de substituição da rede atual;
- Conhecimento na área de autônomos – através do projeto e teste desenvolvido na mina, foi possível conhecer a tecnologia, entender os desafios de implantação e mapear os riscos envolvidos em todo o processo, inclusive importantes métricas de segurança do sistema;
- Levantamento de melhoria na rede – o problema referente a falta de sinal *wireless* levantou uma variável importante em estudos de implantação de autônomos: a rede de comunicação *wireless*, este é um dos principais requisitos para implantação de um sistema autônomo, em função do teste ter sido executado em uma pequena área, denominada *sandbox*, a infraestrutura de rede foi simplificada, utilizando assim uma opção de internet via satélite que viabilizou os testes e possui baixo custo, porém para uma cobertura total da área da mina faz-se necessário um estudo mais aprofundado.

## 5 – CONCLUSÕES

Testes tem como objetivo conduzir uma decisão técnica segura da equipe de projetos e alta direção em relação a uma solução proposta, seja uma tecnologia ou produto, neste sentido pode-se concluir que o teste foi satisfatório. Através da execução do teste foi possível identificar que a tecnologia ainda precisa implementar melhorias nas ferramentas de coleta de dados para munir o estudo de viabilidade econômica de um AHS, esta conclusão embasou a decisão por adiar a aquisição de caminhões autônomos. Sendo identificado a necessidade de uma maior maturidade do fabricante e maior robustez da rede de comunicação *wireless* da mina, o que seria um passo anterior ao investimento em frota autônoma. Todo este estudo possibilitou uma decisão gerencial assertiva acerca da aquisição de caminhões autônomos, mostrando que a ferramenta de validação foi satisfatória.

Do ponto de vista da criação de um fluxograma de processos para execução de teste de validação para caminhões autônomos o projeto mostrou-se favorável. Através do direcionamento do fluxograma foi possível mapear os indicadores necessários para validação do teste, eliminando oito paradas operacionais desnecessárias para o teste e a criação de oito novos indicadores cruciais para medir o desempenho do AHS. No total foram mapeados onze indicadores para acompanhamento no teste de validação de caminhões autônomos, que não puderam ser coletados em sua maioria por conta da ferramenta de coleta selecionada. Sendo assim, identificando a necessidade de rodar o fluxo de processos novamente na etapa de seleção de ferramenta de coleta de dados, onde não se obteve o resultado desejado. O fluxograma de processo, que foi testado em todo o projeto, servirá de base para futuros testes de caminhões autônomos.

No âmbito da criação da AOA de teste desenvolveu-se importantes reflexões em relação aos impactos positivos e negativos, bem como os desafios operacionais e de infraestrutura envolvidos na implantação de uma área autônoma. A principal conclusão em relação a infraestrutura é de que a área de comunicação *wireless* deve estar em um nível de maturidade elevado, para isto é necessário alto investimento em rede, o que pode inclusive ocasionar o adiamento na decisão pela implantação de um AHS no momento.

## **6 – TRABALHOS FUTUROS**

No desenvolvimento do trabalho foi possível levantar diversas linhas de pesquisa que podem ser desenvolvidas a partir de um estudo mais aprofundado, dentre elas pode-se listar:

- Estudo da infraestrutura de rede necessária para atendimento à operação autônoma;
- Estudo da infraestrutura de mina (qualidade de acessos, praças, ponto de descarga, etc.) necessária para atendimento à operação autônoma;
- Estudo comparativo da disponibilidade física dos equipamentos entre sistema tripulado e autônomo;
- Análise de viabilidade financeira para aquisição de equipamentos autônomos.

## 7 - REFERÊNCIAS

ALMEIDA, C. M.; NEVES, T. de C.; FIGUEIREDO, A. C. L. de. Estudo de viabilidade econômica do uso de correias transportadoras nas operações de lavra de uma mina de minério de ferro. **19o Simpósio de Mineração**, p. 1–11, 2018.

AMARAL, M. D; PINTO, L. R. Planejamento de operações de lavra em minas a céu aberto com alocação de equipamentos de carga e de transporte. In: **XLII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL**, Rio Grande do Sul. Anais do XLII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Bento Gonçalves: SOBRAPO, 2010.

AMARAL, M. Modelos matemáticos e heurísticas para auxílio ao planejamento de operações de lavra em minas a céu aberto. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, p. 16-57, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 17757**: Máquinas de movimentação de solo e mineração — Segurança de sistemas de máquinas autônomas e semiautônomas. 1 ed. Rio de Janeiro, 2022. 59 p.

BENLAJILI, Sanaa; MOUTAOUAKKIL, Fouad; CHEBAK, Ahmed. Infrastructural requirements for the implementation of autonomous trucks in open-pit mines. **E3S Web Of Conferences**, [S.L.], v. 315, p. 03009, 2021. EDP Sciences.  
<http://dx.doi.org/10.1051/e3sconf/202131503009>.

BLOM, M.; PEARCE, A. R.; STUCKEY, P. J. Short-term planning for open pit mines: a review. **International Journal of Mining, Reclamation and Environment**, v. 33, n. 5, p. 318–339, 2019.

CALDEIRA, J. **100 Indicadores da Gestão: Key Performance Indicators**. 1. ed. Coimbra: Actual, 2012.

CARARETO, E. S.; JAYME, G.; TAVARES, M. P. Z.; VALE, V. P.; Gestão Estratégica de Custos: custos na tomada de decisão. *Revista de Economia da UEG, Anápolis (GO)*, v. 2, nº 2, 2006.

CHANDA, E. K.; HARDY, R. J. Selection criteria for open pit production equipment - Payload distributions and the “10/10/20” policy. **35th APCOM Symposium - Application of Computers and Operations Research in the Minerals Industry**, Proceedings, n. September, p. 351–364, 2011.

CLARKE, M.P. DENBY, B. SCHOFIELD, D. Decision making tools for surface mine equipment selection. *Mining Science and Technology*, n.10. 1990. Pg 323-335

CÔRTEZ, M.L.; CHIOSSI, T.C.S. **Modelos de Qualidade de Software**. 2º Ed. Campinas: Unicamp, 2001.

COUTO, R. T. Da S. **Lavras a céu aberto e equipamentos principais.** (Dissertação de doutoramento apresentada à Faculdade de Engenharia do Porto). Departamento de Engenharia de Minas, 1990.

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

DIDDENS, Z. M. Integration of Fleet Production and Cost Analysis in Mine Design and Planning 2019. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) - Delft University of Technology, Rotterdam, 2019.

GLOBAL MINING GUIDELINES GROUP. **Guideline for implementation of autonomous systems in mining,** 2021. Disponível em: < <https://gmgroup.org/groups/autonomous-mining/>>. Acesso em 25 nov. 2022.

GÖLBAŞI, O., DAGDELEN, K. “Equipment Replacement Analysis of Manual Trucks with Autonomous Truck Technology in Open Pit Mines”, Proceedings of the International Symposium on the Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry, 2017.

HAMADA, T. SAITO, S. “Autonomous Haulage System for Mining Rationalization”. Hitachi Review, 67(1): 87-92, 2018.

IBRAM – INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Mineração em números.** Disponível em <https://ibram.org.br/publicacoes/?txtSearch=&checkbox-section%5B%5D=161&checkbox-section%5B%5D=162&checkbox-section%5B%5D=1236#publication>. Acesso em: 03 jun. 2022.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Earthmoving machinery and mining—autonomous and semiautonomous machine system safety,** 2017. Disponível em <https://www.iso.org/standard/60473.html>. Acesso em: 27 nov. 2022.

KRAJEWSKI, L.; RITZMAN, L; MALHOTRA, M. **Administração de produção e operações.** São Paulo: Prentice Hall, 2009.

LAGES, A. R. Estudo Preliminar da Influência do porte de Veículos de Carregamento e Transporte nos Custos Operacionais de Minas a Céu Aberto 2018. 69 f. Monografia (Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Palmas, 2018.

MACEDO, A. J. B., BAZANTE, A. J., BONATES, E. J. L. Seleção do método de lavra: arte e ciência. REM - Revista Escola de Minas, Ouro Preto, v. 54, n. 3, p. 221-225, jul./set. 2001.

MEECH, J.A. **An autonomous haulage trucks - the future is now!** Apresentado no Automining 2012, 3rd International Congress on Automation in the Mining Industry. Oct. 19, 2012.

MONIRI-MORAD, A. *et al.* A methodology for truck allocation problems considering dynamic circumstances in open pit mines, case study of the sungun copper mine. **Rudarsko Geolosko Naftni Zbornik**, v. 34, n. 4, p. 57–65, 2019.

MULLARD, Z.; PARREIRA, J. **How automation and key performance indicators (KPIs) contribute to sustainable development in the mining industry** – Presentation. II Second 117 International Conference on Multinational Enterprises and Sustainable Development, ICMESD, Nancy-Mertz, France, Nov. 4-6, 2009.

NEWMAN, A. M. *et al.* A review of operations research in mine planning. **Interfaces**, v. 40, n. 3, p. 222–245, 2010.

OLIVEIRA, D.P.R. *Sistemas, organização e métodos: uma abordagem gerencial*. 12ª Ed. São Paulo: Atlas, 2007.

PARASURAMAN, R.; SHERIDAN, T. B.; WICKENS, C. D. **A Model for types and levels of human interaction with automation**. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Pt. A: Systems and Humans, 2000.

PARREIRA, J. **An interactive simulation model to compare an autonomous haulage truck system with a manually-operated system (T)**. University of British Columbia, 2013.

PASCH, O.; ULUDAG, S. Optimization of the load-and-haul operation at an opencast colliery. **Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, v. 118, n. 5, p. 449–456, 2018.

PERONI, R. L. **Lavra a Céu Aberto – Teoria e Prática**. Porto Alegre: Universidade federal do Rio Grande do Sul, p. 1–172, 2008.

QUEVEDO, J. M. G. Modelo de simulação para o sistema de carregamento e transporte em mina a céu aberto 2009. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Pontifca Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

SILVA, V.C. **Apostila de Carregamento e Transporte de rochas**. Ouro Preto, 2011. Disponível em: < <https://idoc.pub/documents/apostila-carregamento-e-transporte-de-rocha34wmp8e2m8l7>>. Acesso em: 15 nov. 2022.

SIMCSIK, T. **OSM: organização, sistemas e métodos**. São Paulo: Futura, 2001.

SOUSA JÚNIOR, W. T. Seleção de caminhões rodoviários para mineração utilizando a metodologia de auxílio multicritério à decisão: estudo de caso - Mineração de bauxita. Ouro Preto: Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral. 2012. 160 p.

VORONOV, Y., Voronov, A., & Makhambayev, D. **Current State and Development Prospects of Autonomous Haulage at Surface Mines**. In E3S Web of Conferences (Vol. 174, p. 01028). EDP Sciences, 2020.