



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



Lucca Gabriel Galvão Sales Volpi Ramos

ANÁLISE COMPARATIVA DE PRODUTIVIDADE E SEGURANÇA
ENTRE MODOS DE OPERAÇÃO DE CARREGADEIRAS EM SUBSOLO

OURO PRETO - MG
2025

Lucca Gabriel Galvão Sales Volpi Ramos

ANÁLISE COMPARATIVA DE PRODUTIVIDADE E SEGURANÇA
ENTRE MODOS DE OPERAÇÃO DE CARREGADEIRAS EM SUBSOLO

Monografia apresentada ao Curso de
Graduação em Engenharia de Minas
da Universidade Federal de Ouro Preto
como requisito para a obtenção do
título de Engenheiro de Minas.
Professor orientador: Hernani Mota de
Lima.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



FOLHA DE APROVAÇÃO

Lucca Gabriel Galvão Sales Volpi Ramos

Análise comparativa de produtividade e segurança entre modos de operação de carregadeiras em subsolo

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

Aprovada em 15 de agosto de 2025

Membros da banca

Dr. Hernani Mota de Lima - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. Elton Destro - Universidade Federal de Ouro Preto
Engenheiro de Minas - André Luis Araújo Oliveira - Universidade Federal de Ouro Preto

Hernani Mota de Lima, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 26/08/2025



Documento assinado eletronicamente por **Hernani Mota de Lima, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 28/08/2025, às 10:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0968505** e o código CRC **E9ABEE0F**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.010918/2025-11

SEI nº 0968505

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35402-163
Telefone: 3135591590 - www.ufop.br

Agradeço a Deus, aos professores da Escola de Minas/UFOP, à República Tira Mágoa, aos amigos e família (pai, mãe, irmão). O apoio de todos foi essencial para esta conquista.

AGRADECIMENTO

A concretização deste Trabalho de Conclusão de Curso é fruto de um esforço coletivo e do apoio incondicional de muitas pessoas e instituições, às quais expresso minha mais profunda gratidão.

Primeiramente, a **Deus**, por me conceder força, sabedoria e perseverança para superar os desafios e alcançar esta importante etapa.

Ao meu orientador, **Prof. Hernani Mota de Lima**, por sua inestimável orientação, paciência, dedicação e por compartilhar seu vasto conhecimento, que foram fundamentais para o desenvolvimento e aprimoramento deste trabalho. Seu incentivo e confiança foram essenciais em cada etapa.

Aos professores do curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), por todos os ensinamentos, desafios e por moldarem não apenas profissionais, mas cidadãos críticos e engajados.

À Escola de Minas que, por sua vez, representou um ambiente de aprendizado e crescimento inigualáveis.

À minha querida **República Tira Mágoa**, que foi mais do que um lar, um verdadeiro porto seguro e fonte de incontáveis momentos de alegria, companheirismo e apoio mútuo. As memórias e amizades construídas ali serão eternas.

Aos amigos do curso, pela parceria, pelas discussões acadêmicas e pelos momentos de descontração que tornaram a jornada universitária muito mais leve e significativa. Vocês foram a força nos momentos difíceis e a alegria nas conquistas.

À minha família, meu alicerce e maior inspiração. Em especial, ao meu **pai**, à minha **mãe** e ao meu **irmão**, por todo o amor, suporte incondicional, compreensão e sacrifícios. Sem o apoio e a crença de vocês, nada disso seria possível. Esta conquista é nossa.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste sonho, meu sincero muito obrigado.

***"A mente que se abre a uma nova ideia jamais
volta ao seu tamanho original".***

Albert Einstein

RESUMO

Este Trabalho de Conclusão de Curso realiza uma análise comparativa, um estudo focado em carregadeiras *Load-Haul-Dump* (LHDs) operadas manualmente e LHDs controladas remotamente, em uma mina subterrânea de ouro no estado de Minas Gerais. A pesquisa justifica-se pela necessidade de avaliar os impactos desses modos de operação na produtividade, segurança, custos de instalação e manutenção, e fatores humanos, subsidiando decisões estratégicas. A metodologia envolveu a coleta e análise de dados operacionais, obtidos por meio de um sistema "tracker" e processados em uma ferramenta OLAP. Os resultados operacionais da mina de estudo de caso, coletados ao longo de 2024, indicam que a produtividade média anual da teleoperação (152 t/h) é quase idêntica à da operação manual (155 t/h). A análise aprofundada sugere que, embora a operação remota seja impactada negativamente pela limitação em primeira marcha, uma medida de segurança para evitar danos aos equipamentos, ela demonstra um potencial de eficiência que compensa essa restrição. Um estudo de caso de uma mina similar com tecnologia TecWise/RCT ilustra a aplicação prática e os benefícios de mais de R\$70 milhões. Conclui-se que, apesar dos desafios técnicos e do alto investimento inicial, a teleoperação oferece ganhos substanciais em segurança e, mesmo sob condições de limitação operacional.

Palavras-chave: Mineração Subterrânea; LHD; Teleoperação; Automação; Produtividade; Segurança.

ABSTRACT

This Final Project conducts a comparative analysis, a study focused on manually operated Load-Haul-Dump (LHD) loaders and remotely controlled LHDs, in an underground gold mine in the state of Minas Gerais. This research is justified by the need to evaluate the impacts of these operating modes on productivity, safety, installation and maintenance costs, and human factors, supporting strategic decisions. The methodology involved collecting and analyzing operational data, obtained through a "tracker" system and processed in an OLAP tool. Empirical results, collected throughout 2024, indicate that the average annual productivity of teleoperation (152 t/h) is almost identical to that of manual operation (155 t/h). Further analysis suggests that, while remote operation is negatively impacted by the first-gear limitation—a safety measure to prevent equipment damage—it demonstrates an efficiency potential that compensates for this restriction. A case study from a similar mine with TecWise/RCT technology illustrates the practical application and factual benefits exceeding R\$70 million. It is concluded that, despite technical challenges and a high initial investment, teleoperation offers substantial safety gains and, even under operational limitations, can achieve productivity levels comparable to manual operation.

Keywords: Underground Mining; LHD; Teleoperation; Automation; Productivity; Safety.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de Estação de Controle Remoto de LHD.....	19
Figura 2 – Diagrama de Fluxo de Operação de LHD Manual.....	20
Figura 3 – Diagrama de Fluxo de Operação de LHD Semiautônoma.....	21
Figura 4 – LHD em Operação Teleoperada no Subsolo (Caterpillar, [s.d.].....	22
Figura 5 – Comparativo de utilização efetiva em trocas de turno de LHDs Telerremotas	37
Figura 6 – Comparativo de utilização efetiva em trocas de turno de LHDs Manuais.....	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Quadro Comparativo de Níveis de Automação.	17
Tabela 2 – Relação de coleta de dados	31
Tabela 3 – Comparativo de Produtividade de LHDs (Manual vs. Teleoperada) por Mês	33
Tabela 4 – Comparativo de Tempos de Ciclo e Produtividade	35
Tabela 5 – Comparativo de Exposição a Riscos	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAGR - *Compound Annual Growth Rate* (Taxa de Crescimento Anual Composta)

ESG - *Environmental, Social, and Governance* (Ambiental, Social e Governança)

IA - Inteligência Artificial

IMU - *Inertial Measurement Unit* (Unidade de Medição Inercial)

KPI - *Key Performance Indicator* (Indicador Chave de Desempenho)

LHD - *Load-Haul-Dump* (Carregadeira, Transportadora e Descarregadora)

MTBR - *Mean Time Between Failures* (Tempo Médio Entre Falhas)

NR - Norma Regulamentadora

OLAP - *Online Analytical Processing*

ROI - *Return on Investment* (Retorno sobre o Investimento)

TCO - *Total Cost of Ownership* (Custo Total de Propriedade)

WLAN - *Wireless Local Area Network* (Rede Local Sem Fio)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
1.1	Formulação do Problema.....	9
1.2	Justificativa.....	10
1.3	Objetivos.....	11
1.3.1	Geral	11
1.3.2	Específicos.....	11
1.4	Estrutura do Trabalho	11
2	CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA	13
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1	Conceitos e Princípios da Teleoperação de LHDs	15
3.1.1	Definição e Níveis de Automação	15
3.1.2	Componentes Tecnológicos Essenciais	17
3.1.3	O Ciclo Operacional de LHDs e as Adaptações para a Teleoperação.....	20
3.2	Benefícios da Teleoperação de LHDs na Mineração Subterrânea	23
3.2.1	Aumento da Segurança Operacional	23
3.2.2	Melhora da Produtividade e Eficiência	24
3.2.3	Redução de Custos Operacionais	26
3.3	Desafios e Considerações na Implementação.....	27
3.3.1	Desafios Técnicos.....	28
3.3.2	Desafios Humanos e Organizacionais	28
3.3.3	Custos de Implementação e Retorno sobre o Investimento (ROI)	28
3.4	Perspectivas Futuras e Tendências	29
3.4.1	Crescimento do Mercado e Adoção da Automação	29
3.4.2	Transição para Modelos Elétricos e Híbridos.....	29
4	METODOLOGIA.....	31
4.1	Tipo de Pesquisa.....	31
4.2	Coleta de Dados.....	31
4.3	Análise de Dados	32
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
5.1	Análise Comparativa de Produtividade e Eficiência	33
5.2	Análise Comparativa de Utilização Efetiva (UE).....	36

5.3	Análise Comparativa de Segurança	38
5.4	Análise de Custos Operacionais, Manutenção e Viabilidade Econômica	39
5.5	Análise dos Fatores Humanos e Desafios.....	40
5.6	Estudo de Caso e Benchmarks.....	42
6	CONCLUSÃO.....	43
7	REFERÊNCIAS	

1 INTRODUÇÃO

A mineração subterrânea de ouro é uma atividade complexa e de alto risco, exigindo equipamentos robustos e eficientes para garantir a extração segura e produtiva do minério (CURI, 2017). As carregadeiras *Load-Haul-Dump* (LHDs) são a espinha dorsal das operações de lavra e transporte de material em minas subterrâneas, responsáveis por tarefas cíclicas e repetitivas de carregamento, transporte e descarregamento de material minerado (TARIQ, 2025). Esses equipamentos são projetados para as condições mais exigentes da mineração de rocha dura, considerando a economia geral de produção, segurança e confiabilidade (CATERPILLAR, [s.d.]). Sua concepção, com perfis mais estreitos, longos e baixos, as torna ideais para ambientes subterrâneos com limitações de altura e largura (CATERPILLAR, [s.d.]). Em uma mina subterrânea de ouro no estado de Minas Gerais, os modelos utilizados incluem a CAT R1700 (14 toneladas) e a CAT R2900 (17 toneladas).

Historicamente, as LHDs a diesel dominaram o mercado, operadas manualmente por um operador a bordo (TARIQ, 2025; PAIVA, 2016). No entanto, a indústria de mineração está em uma transição significativa, impulsionada pela busca por maior segurança, produtividade e eficiência (PAIVA, 2016). A automação de LHDs tem avançado de operações com linha de visada para teleoperadas, semi-autônomas e, em alguns casos, totalmente autônomas (TARIQ, 2025). Essa evolução visa remover os operadores de áreas de alto risco, melhorar a consistência da operação e aumentar as taxas de utilização dos equipamentos (CDC, [s.d.]). A capacidade de operar equipamentos remotamente, inclusive da superfície, permite o trabalho durante janelas de detonação e reduz o tempo de deslocamento dos operadores, otimizando o tempo produtivo (JAYANTA; YOGESH, 2013; EPIROC, 2025).

O presente Trabalho de Conclusão de Curso tem como objetivo realizar uma análise comparativa abrangente entre carregadeiras LHD operadas manualmente e carregadeiras LHD controladas remotamente em uma mina subterrânea de ouro no estado de Minas Gerais. A análise abordará aspectos críticos como produtividade, segurança, custos de instalação e manutenção, fatores humanos e desafios operacionais, com base em dados técnicos e operacionais. O propósito é fornecer uma avaliação detalhada que auxilie na compreensão das vantagens e desvantagens de cada modo de operação, subsidiando futuras decisões estratégicas de investimento e otimização operacional.

1.1 Formulação do Problema

A mineração subterrânea de ouro, embora essencial, é caracterizada por um ambiente de trabalho intrinsecamente perigoso e de alta complexidade operacional. A presença humana em frentes de lavra expõe os operadores de carregadeiras LHD a riscos significativos, como quedas de rocha, exposição a poeira, ruído, vibração e gases tóxicos, além de acidentes relacionados a equipamentos (RIZZO, 2021; HETHERINGTON, [s.d.]). Concomitantemente, a busca por maior produtividade e eficiência operacional é uma constante na indústria, exigindo a otimização do ciclo de carregamento e transporte de minério.

Diante da evolução tecnológica, a teleoperação de LHDs surge como uma alternativa promissora para mitigar os riscos de segurança e potencializar a produtividade. No entanto, a transição da operação manual para a remota envolve desafios técnicos, como a necessidade de infraestrutura de comunicação robusta e de baixa latência (CELONA, [s.d.]; QUALCOMM, [s.d.]), e desafios humanos e organizacionais, como a resistência cultural à automação (DISCOVERY ALERT, 2025) e a necessidade de requalificação da força de trabalho (PAIVA, 2016). Além disso, o alto investimento inicial em sistemas telerremotos e a complexidade de sua manutenção exigem uma análise econômica aprofundada para justificar o Retorno sobre o Investimento (ROI). Em uma mina subterrânea de ouro no estado de Minas Gerais, a produtividade das LHDs teleoperadas é impactada por limitações operacionais, como a operação travada em primeira marcha, o que gera a necessidade de muitas manutenções corretivas e afeta diretamente a eficiência e os custos (DADOS DA MINA, [s.d.]).

Nesse contexto, surge a seguinte questão de pesquisa: Qual o impacto comparativo da teleoperação de carregadeiras LHD em relação à operação manual, em termos de produtividade, segurança e viabilidade econômica, em uma mina subterrânea de ouro, considerando os desafios de implementação e as soluções tecnológicas disponíveis, como as oferecidas pela TecWise/RCT?

1.2 Justificativa

A crescente complexidade e os riscos inerentes à mineração subterrânea, somados à pressão por maior eficiência e sustentabilidade, tornam a análise comparativa entre modos de operação de carregadeiras LHD um tema de extrema relevância para a indústria. Este trabalho se justifica pela necessidade de fornecer informações técnicas e operacionais detalhadas que possam subsidiar decisões estratégicas de investimento e otimização em minas subterrâneas de ouro.

A transição para a teleoperação e automação de LHDs não é apenas uma questão de avanço tecnológico, mas um imperativo para a segurança dos trabalhadores, que são removidos de ambientes de alto risco, e para a competitividade das operações, que podem alcançar níveis de produtividade e utilização de equipamentos inatingíveis com métodos manuais. A compreensão aprofundada dos KPIs de produtividade, dos custos de implantação e manutenção, e dos fatores humanos envolvidos é crucial para uma tomada de decisão embasada. A inclusão de dados operacionais da mina em estudo, como as produtividades específicas e as limitações operacionais atuais, confere ao trabalho um valor prático e direto para a realidade da empresa.

Além disso, a inclusão de um estudo de caso documentado por fontes da indústria, que demonstram os benefícios tangíveis e os desafios superados na implementação da teleoperação no contexto brasileiro (REVISTA MINÉRIOS, 2024), confere ao trabalho um caráter prático e aplicável. A análise dos desafios técnicos, humanos e econômicos, bem como das perspectivas futuras, permitirá que a mina em questão avalie a viabilidade de adotar ou expandir a automação de suas LHDs, otimizando seus processos e garantindo um ambiente de trabalho mais seguro e produtivo.

Em um cenário onde a mineração subterrânea se aprofunda e as exigências de segurança e eficiência aumentam, este estudo contribuirá significativamente para o conhecimento da área, oferecendo um guia para a modernização das operações e para a formação de profissionais aptos a lidar com as tecnologias do futuro.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Realizar uma análise comparativa entre carregadeiras LHD operadas manualmente e remotamente, com foco em produtividade, segurança, custos, fatores humanos e viabilidade técnica.

1.3.2 Específicos

- Descrever os princípios e níveis de automação de LHDs.
- Identificar indicadores-chave de desempenho (KPIs) e analisar a produtividade.
- Avaliar custos de instalação e manutenção.
- Comparar exposição a riscos ocupacionais.
- Investigar aspectos humanos: fadiga, carga cognitiva, resistência à automação.
- Realizar análise de TCO e ROI.
- Apresentar estudo de caso de uma mina subterrânea de ouro no estado de Minas Gerais com tecnologia TecWise/RCT.
- Discutir tendências de automação e eletrificação em mineração subterrânea.

1.4 Estrutura do Trabalho

- **INTRODUÇÃO:** Apresentação do tema, contextualização da mineração subterrânea de ouro e a importância das LHDs, evolução tecnológica e o objetivo do estudo. Inclui a formulação do problema, justificativa, objetivos e a estrutura do trabalho.
- **CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA:** Abordagem da evolução das LHDs e da automação na mineração subterrânea.
- **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA:** Aprofundamento dos conceitos, princípios, benefícios, desafios e tendências da teleoperação de LHDs, incluindo as soluções da TecWise/RCT.
- **METODOLOGIA:** Descrição do tipo de pesquisa, métodos de coleta e análise de dados.

- **RESULTADOS E DISCUSSÃO:** Apresentação e análise dos dados operacionais da mina, comparando os modos de operação e discutindo os resultados à luz da revisão bibliográfica.
- **CONCLUSÃO:** Síntese dos principais resultados e implicações do estudo.
- **REFERÊNCIAS:** Listagem de todas as referências utilizadas no trabalho, conforme as normas da ABNT.

2 CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA

A história da mineração subterrânea é marcada por uma constante evolução das técnicas e equipamentos, impulsionada pela necessidade de acessar depósitos minerais cada vez mais profundos e pela busca incessante por maior segurança e eficiência operacional. As carregadeiras *Load-Haul-Dump* (LHDs) surgiram como um marco nessa evolução, substituindo métodos mais rudimentares de carregamento e transporte de minério em ambientes confinados.

As LHDs surgiram como um marco nessa evolução, substituindo métodos mais rudimentares de carregamento e transporte, como a paleação ou o uso de vagonetas em trilhos, que eram menos flexíveis (Silva, 2024). Inicialmente, as operações de LHD eram predominantemente manuais, com operadores fisicamente presentes na cabine, controlando diretamente a máquina. Essa modalidade, embora eficaz para a época, expunha os trabalhadores a um ambiente hostil, com riscos inerentes à operação de equipamentos pesados em espaços limitados, além da exposição a poeira, ruído e gases de exaustão (RIZZO, 2021; HETHERINGTON, [s.d.]).

A partir do final do século XX e início do século XXI, a indústria de mineração começou a explorar o potencial da automação e do controle remoto. A motivação inicial era, sobretudo, a segurança, visando remover o operador de áreas de alto risco (RCT GLOBAL, 2021). Com o tempo, percebeu-se que a automação trazia benefícios adicionais, como a consistência operacional, o aumento da produtividade e a otimização da utilização dos equipamentos.

A evolução da teleoperação de LHDs passou por estágios, desde o controle por linha de visada, onde o operador ainda precisava ter o equipamento à vista, até sistemas teleoperados mais avançados, que utilizam redes de comunicação para permitir o controle a partir de estações remotas, inclusive na superfície. O desenvolvimento de sistemas semi-autônomos, onde o transporte e o descarregamento são automatizados e apenas o carregamento é teleoperado, tornou-se uma solução intermediária amplamente adotada, buscando um equilíbrio entre automação e flexibilidade operacional.

Empresas como a RCT (Remote Control Technologies), com parceiros como a TecWise no Brasil (RCT GLOBAL, [s.d.]), têm sido pioneiras nesse desenvolvimento, oferecendo soluções que permitem a operação de LHDs a partir de centros de controle remotos, com o uso de câmeras e sensores. Essa trajetória histórica demonstra uma clara tendência da mineração subterrânea em direção a operações cada vez mais seguras, eficientes e tecnologicamente

avançadas, com a automação desempenhando um papel central na redefinição dos paradigmas de trabalho e produção.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica aprofunda os conceitos, benefícios, desafios e tendências da teleoperação de LHDs em minas subterrâneas, com foco nas soluções da TecWise/RCT e na fundamentação teórica da área.

3.1 Conceitos e Princípios da Teleoperação de LHDs

A teleoperação de LHDs representa um avanço significativo na mineração subterrânea, permitindo o controle de equipamentos a partir de uma distância segura. Compreender seus diferentes níveis e os componentes tecnológicos envolvidos é fundamental para apreciar seu impacto.

3.1.1 Definição e Níveis de Automação

Uma LHD (*Load-Haul-Dump*) é, fundamentalmente, uma carregadeira articulada de quatro rodas equipada com uma caçamba frontal, empregada para carregar e transportar minério nos níveis de produção de uma mina subterrânea (TAMPIER, 2021; CATERPILLAR, [s.d.]). A automação dessas máquinas progrediu significativamente, abrangendo desde o controle por linha de visada até sistemas totalmente autônomos (TARIQ, 2025; JAYANTA; YOGESH, 2013).

Os níveis de automação para equipamentos de mineração subterrânea, incluindo LHDs, podem ser categorizados da seguinte forma (ALPHA TECHNOLOGY, [s.d.]):

- **Controle Remoto por Linha de Visada:** Neste nível, o operador controla o veículo à distância, mas deve manter o equipamento dentro de seu campo de visão direto. Embora garanta uma segurança inicial ao afastar o operador de áreas perigosas, a eficiência pode ser limitada pela visibilidade e pela fadiga do operador, que precisa monitorar constantemente a máquina (ALPHA TECHNOLOGY, [s.d.]). A distância de controle remoto é geralmente de 100 a 500 metros (ALPHA TECHNOLOGY, [s.d.]).
- **Controle Teleoperado Manual (ou Preliminar):** O veículo é integrado à rede da mina, permitindo o controle remoto a partir de uma estação segura (na superfície ou em outro local no subsolo). Neste modo, o operador controla manualmente todas as funções da LHD (carregamento, transporte e despejo) à distância, utilizando câmeras e sensores para percepção do ambiente. A operação é predominantemente manual,

sem funções autônomas de navegação ou posicionamento, e a eficiência pode ser ligeiramente inferior à do controle manual direto, muitas vezes limitada a velocidades mais baixas para garantir a segurança e evitar colisões em um ambiente com percepção mediada (ALPHA TECHNOLOGY, [s.d.]).

- **Controle Teleoperado Semi-autônomo:** Este é um dos modos mais comuns atualmente em uso (TARIQ, 2025). Nele, as fases de transporte (*hauling*) e descarregamento (*dumping*) são autônomas, com a máquina realizando essas tarefas de forma independente. No entanto, a fase de carregamento (*loading*) ainda é controlada remotamente por um operador (TARIQ, 2025; JAYANTA; YOGESH, 2013). Um único operador pode supervisionar e operar múltiplos veículos (até 3) simultaneamente a partir de uma estação de controle, o que resulta em alta produtividade e maior tempo de produção (ALPHA TECHNOLOGY, [s.d.]).
- **Controle Teleoperado Autônomo:** Neste nível, o processo completo de carregamento, transporte e descarregamento é realizado autonomamente, com o operador assumindo um papel de supervisão. Atualmente, apenas algumas empresas de renome internacional, como Epiroc e Sandvik, comercializaram essa tecnologia (ALPHA TECHNOLOGY, [s.d.]; SAIMAA; LAURILA; JOUKKO, 2015).

A progressão entre esses níveis de automação reflete uma busca contínua por maior segurança e eficiência. Contudo, essa evolução também expõe a complexidade crescente de certas tarefas, como o carregamento. O fato de o carregamento totalmente autônomo ainda ser uma técnica em desenvolvimento (TARIQ, 2025) sugere que a interação da caçamba com o material fragmentado é um desafio técnico substancial. Essa complexidade decorre da natureza imprevisível da pilha de minério, que varia em granulometria, coesão e geometria, exigindo da máquina uma percepção avançada e um controle de força que vai além da simples navegação. A dificuldade em automatizar completamente a fase de carregamento indica uma limitação nas tecnologias de sensores e algoritmos de inteligência artificial atuais para replicar o julgamento humano sutil necessário para um enchimento eficiente da caçamba em condições tão dinâmicas e não estruturadas. Este ponto representa um gargalo crítico para alcançar a autonomia total da LHD.

Tabela 1 – Quadro Comparativo de Níveis de Automação

Nível de Operação	Características Principais	Eficiência	Exposição a Risco
Linha de Visada	Controle direto visual com rádio; curto alcance.	Baixa	Reduzida
Teleoperado Manual	Controle por câmeras e sensores; operação à distância.	Moderada	Nula
Semi-autônomo	Transporte e despejo automáticos; carregamento remoto.	Alta	Nula
Totalmente Autônomo	Todo o ciclo automatizado; operador supervisiona.	Muito alta	Nula

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

3.1.2 Componentes Tecnológicos Essenciais

A funcionalidade da teleoperação de LHDs depende de uma intrincada rede de componentes tecnológicos que se interligam para permitir o controle remoto e a automação das operações.

- **Sistemas de Controle Remoto:** O sistema de controle remoto de uma LHD é composto por quatro partes principais: um transmissor de controle remoto, um receptor veicular, uma unidade hidráulica e uma unidade elétrica (ALPHA TECHNOLOGY, [s.d.]). O transmissor, que pode incluir uma tela de 7 ou 9 polegadas e câmeras com certificação IP69K (à prova d'água e choque), opera com frequências de comunicação sem fio de 433MHz, 915MHz ou 2.4GHz e uma taxa de transmissão de 1Mbps, com alcance de pelo menos 40 metros (ALPHA TECHNOLOGY, [s.d.]). O receptor veicular, por sua vez, possui características de comunicação semelhantes e é responsável por receber os comandos e transmiti-los para as unidades hidráulica

e elétrica da máquina, que são integradas aos sistemas de controle originais do equipamento e permitem alternar entre modos de operação manual e remoto (ALPHA TECHNOLOGY, [s.d.]).

- **Redes de Comunicação:** A infraestrutura de comunicação é um pilar fundamental para a teleoperação, permitindo a troca de dados em tempo real entre o equipamento e a estação de controle. Minas subterrâneas avançadas utilizam redes locais sem fio (WLAN) para a transmissão de dados cruciais, como planos de perfuração, pressões de impacto, rotação e outros parâmetros operacionais (PAIVA, 2016). Essas redes são compostas por diversos elementos, incluindo roteadores, switches Ethernet, pontos de acesso WLAN, telefones VoIP e câmeras de vídeo, todos interligados para formar uma plataforma de comunicação robusta (PAIVA, 2016). Apesar dos avanços, a implementação de redes de comunicação em ambientes subterrâneos apresenta desafios significativos. A interoperabilidade entre diferentes sistemas e a adequação das redes sem fio são obstáculos notáveis para a automação bem-sucedida (SAHAY; JHA, 2014). A latência de comunicação, ou seja, o atraso na transmissão de informações, é um problema crítico em sistemas de controle em tempo real, pois pode levar a decisões baseadas em dados desatualizados (CELONA, [s.d.]; QUALCOMM, [s.d.]). A sofisticação da teleoperação e automação de LHDs depende criticamente da integração de múltiplas tecnologias. A robustez da rede de comunicação, caracterizada por baixa latência e alta capacidade, é um gargalo fundamental. Uma falha ou latência excessiva em qualquer um desses componentes – sensores, comunicação ou controle – pode comprometer a segurança e a produtividade da operação, introduzindo novos modos de falha. Isso destaca uma interdependência sistêmica: o "cérebro" (sistema de controle) depende de "sentidos" precisos e oportunos (sensores) e de um "sistema nervoso" robusto (rede de comunicação). Se qualquer parte dessa cadeia for comprometida, a integridade e o desempenho de todo o sistema estarão em risco. Essa dependência de infraestruturas de TI complexas introduz novas vulnerabilidades, como cibersegurança e estabilidade da rede, que se tornam primordiais.
- **Tecnologias de Sensores:** LHDs autônomas comerciais empregam uma variedade de sensores para percepção do ambiente e navegação. Lidars 2D, odometria e unidades de medição inercial (IMUs) são comumente utilizados, e seus dados são fundidos por algoritmos de filtragem para determinar a posição precisa do veículo em um

mapa (SAIMAA; LAURILA; JOUKKO, 2015; SAHAY; JHA, 2014). Para o carregamento autônomo, o sistema de sensores é projetado para identificar a pilha de rocha, posicionar a LHD de forma otimizada, executar a escavação e o carregamento, realizar o recuo e, finalmente, pesar a carga (TAMPIER, 2021).

- **Sistemas de Controle:** No nível de gestão, sistemas ERP (Enterprise Resource Planning), como o sistema KaTTi, atuam como plataformas centrais que integram diversas funções da mina, incluindo planejamento, produção, manutenção, visualização 3D da mina, geologia e administração geral (PAIVA, 2016). Além disso, salas de controle de processo são estabelecidas para o monitoramento em tempo real da frota de equipamentos, permitindo a supervisão de vários parâmetros e a intervenção em operações unitárias, como ventilação ou britagem (PAIVA, 2016).

Figura 1 – Exemplo de Estação de Controle Remoto de LHD

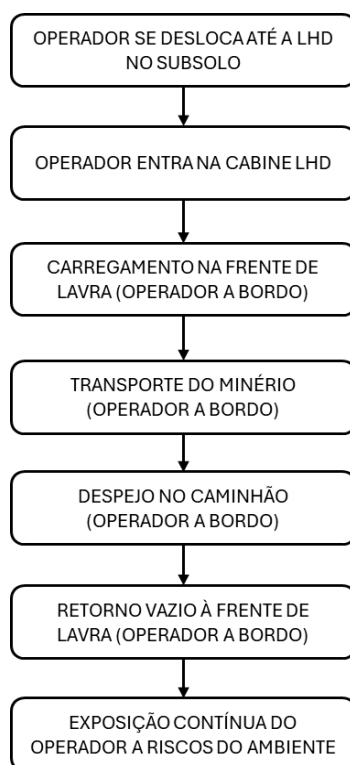


Fonte: RCT Global, [s.d.]

3.1.3 O Ciclo Operacional de LHDs e as Adaptações para a Teleoperação

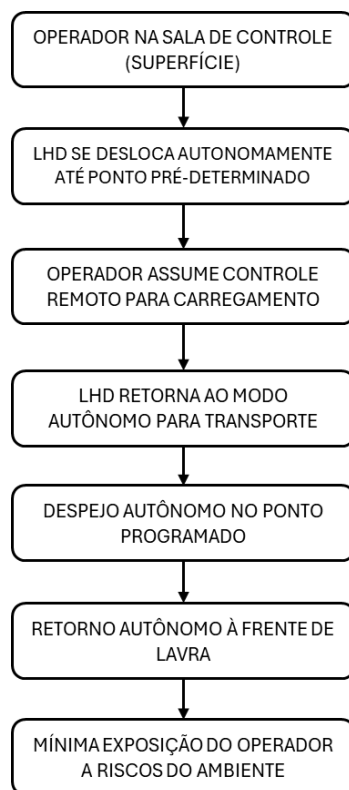
O ciclo operacional de uma LHD em mineração subterrânea é composto por etapas sequenciais: carregamento do material, transporte com a caçamba cheia até o ponto de descarregamento e retorno com a caçamba vazia ao ponto de carregamento (TARIQ, 2025; UFMG, [s.d.]; RASHID, 2022). A produtividade do equipamento é diretamente influenciada pelo tempo de ciclo, que é o tempo total necessário para completar uma dessas sequências (TARIQ, 2025; UFMG, [s.d.]).

Figura 2 – Diagrama de Fluxo de Operação de LHD Manual



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Figura 3 – Diagrama de Fluxo de Operação de LHD Semiautônoma



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

O tempo de ciclo de uma LHD (T_{cicloc}) é calculado como o produto do tempo de passagem (T_{passe}) e do número de passagens necessárias para encher um caminhão ou descarregar em um ponto específico (UFMG, [s.d.]). O tempo de passagem, por sua vez, é a soma dos tempos de carregamento (T_{cc}), transporte carregado (T_{tcc}), descarregamento (T_{bc}) e retorno vazio (T_{tvc}) (UFMG, [s.d.]). A produtividade é também calculada pela capacidade média de carga dividida pelo tempo total de ciclo, incluindo tempos de manobra, atrasos operacionais e ociosidade (UFMG, [s.d.]). A produtividade diária de uma LHD pode variar significativamente, de 103 a 452 toneladas por dia, dependendo das condições de mineração e do layout da frente de trabalho, sendo que maiores distâncias de transporte e gradientes mais íngremes tendem a reduzir a produtividade (ALI, 2019).

Na operação semi-autônoma, o processo é adaptado para otimizar a segurança e a eficiência. A LHD se desloca autonomamente até um ponto pré-determinado antes da frente de lavra. Nesse ponto, o operador assume o controle remoto para realizar a fase de carregamento, que ainda é considerada a mais complexa e variável do ciclo (TARIQ, 2025). A duração do carregamento abrange o tempo que o operador leva para assumir o controle, encher a caçamba e reativar o modo autônomo da máquina (TARIQ, 2025). Após o carregamento, o LHD retorna

ao modo autônomo para o transporte e descarregamento. Durante o descarregamento, o operador remoto também pode controlar rompedores de rocha para fragmentar blocos maiores que dificultem o fluxo do minério no *ore pass* (TARIQ, 2025). A duração do transporte é determinada pela distância e pela velocidade de deslocamento, que pode ser afetada por fatores como a qualidade da estrada, a inclinação, as condições da máquina, a eficiência do operador, o projeto da mina e o congestionamento do tráfego (TARIQ, 2025).

Figura 4 – LHD em Operação Teleoperada no Subsolo



Fonte: Caterpillar, [s.d.]

No caso da mina em estudo, a teleoperação é realizada no modo de "Controle Teleoperado Manual", onde o operador controla todas as etapas do ciclo (carregamento, transporte e despejo) de forma manual, mas a partir de uma estação remota. A distância média do ponto de carregamento (PC) até a lavra é de 150 metros (DADOS DA MINA, [s.d.]). Observou-se, ainda, que as LHDs nesta modalidade operam travadas em primeira marcha. Tal limitação é uma medida de segurança para evitar danos e manter a disponibilidade física, visto que o operador remoto não tem a mesma percepção para avaliar as trocas de marcha e potenciais

colisões como o operador a bordo. Essa restrição impacta diretamente a velocidade de transporte, a produtividade e a frequência de manutenções corretivas (DADOS DA MINA, [s.d.]). Problemas em elementos rotativos e sobrecargas dinâmicas são aspectos conhecidos na análise de condição técnica de LHDs (BORIS; ZDENKA, 2021; DIVA-PORTAL.ORG, [s.d.]).

A persistência da intervenção humana na fase de carregamento em sistemas semi-autônomos, conforme observado, indica que, embora a automação remova o operador do ambiente físico de perigo, a eficiência total do ciclo ainda está intrinsecamente ligada à habilidade humana na fase mais complexa e variável da operação. Isso sugere que o "fator humano" não é eliminado, mas redefinido. O papel do operador evolui de um controlador direto para um supervisor e solucionador de problemas, tornando a interface humano-máquina e o treinamento do operador ainda mais cruciais para otimizar o desempenho geral do sistema.

3.2 Benefícios da Teleoperação de LHDs na Mineração Subterrânea

A implementação da teleoperação de LHDs na mineração subterrânea traz uma série de benefícios multifacetados, que se estendem da segurança à produtividade e à otimização de custos.

3.2.1 Aumento da Segurança Operacional

A segurança é, historicamente, o principal impulsionador da automação na mineração subterrânea (RCT GLOBAL, 2021). A teleoperação permite a remoção do operador de ambientes de alto risco, como as frentes de lavra, que são suscetíveis a quedas de rocha, exposição a gases tóxicos, altas temperaturas e condições de ventilação desfavoráveis (CDC, [s.d.]; HETHERINGTON, [s.d.]; RIZZO, 2021; DISCOVERY ALERT, 2025). Ao realocar os operadores para estações de controle na superfície, em ambientes ergonômicos e seguros, a exposição direta a esses perigos é drasticamente reduzida (REVISTA MINÉRIOS, 2024).

Além da eliminação da exposição direta, a teleoperação mitiga riscos associados a erros humanos, como fadiga, distração ou treinamento insuficiente, que são causas comuns de acidentes em operações manuais (HETHERINGTON, 2024). Equipamentos teleoperados podem ser equipados com sistemas avançados de prevenção de colisões, que utilizam sensores e câmeras para identificar e evitar obstáculos, contribuindo para operações mais seguras, especialmente em ambientes com visibilidade limitada (HETHERINGTON, 2024). A tecnologia também viabiliza a operação segura em áreas que antes eram inacessíveis devido a questões geotécnicas ou condições ambientais críticas, como altas temperaturas e ventilação

desfavorável, permitindo a recuperação de minério em locais antes considerados inviáveis (REVISTA MINÉRIOS, 2024).

A Norma Regulamentadora 22 (NR 22), que trata da Segurança e Saúde Ocupacional na Mineração, estabelece um arcabouço regulatório que, embora não mencione explicitamente a teleoperação de LHDs, abrange diversos requisitos que suportam e são aprimorados por essa tecnologia. A norma exige planos de trânsito para veículos, sinalização adequada, manutenção de vias, treinamento e autorização de operadores, e sistemas de segurança para máquinas autopropelidas, como dispositivos de travamento e sinalização sonora de partida (BRASIL, 2024). A possibilidade de intervenções por "meios tecnológicos remotos" em áreas com alta concentração de metano (igual ou superior a 2%) é explicitamente mencionada na NR 22 como uma medida de segurança, o que valida o uso de LHDs teleoperadas para tarefas em zonas de risco (BRASIL, 2024).

A teleoperação não apenas reduz a exposição direta a perigos, mas também transforma a natureza dos riscos na mineração. Ao afastar o operador do ambiente físico, os riscos tradicionais são mitigados, e as falhas humanas, como fadiga e distração, são minimizadas. No entanto, essa mudança exige novas estratégias para gerenciar riscos tecnológicos e de sistema, como falhas de software, interrupções de comunicação e ataques cibernéticos (CDC, [s.d.]; HETHERINGTON, 2024). Isso implica uma mudança no perfil de risco, onde a segurança cibernética e a resiliência da rede se tornam tão críticas quanto o controle de solo e a ventilação.

Um exemplo de sucesso foi documentado em um estudo de caso brasileiro, onde a implementação da teleoperação resultou na eliminação dos riscos de segurança para os operadores, que foram realocados para a superfície (REVISTA MINÉRIOS, 2024). A tecnologia permitiu ainda a operação segura em áreas com visibilidade limitada ou condições geotécnicas críticas.

3.2.2 Melhora da Produtividade e Eficiência

A teleoperação de LHDs tem demonstrado um impacto significativo na produtividade e eficiência das operações de mineração subterrânea. Estudos de caso, como o da Perilya, comparando soluções de teleoperação de superfície com soluções convencionais, revelaram ganhos notáveis (EPIROC, 2025). As horas produtivas totais aumentaram de 7,5-8,5 horas para até 11 horas com a solução de controle de superfície (EPIROC, 2025). A utilização mecânica também registrou um aumento entre 25% e 50% (EPIROC, 2025). Em termos de material movimentado, a solução de teleoperação de superfície alcançou entre 880 e 1300 toneladas por

turno de 12 horas (80-121 caçambas), em comparação com 550-880 toneladas (50-80 caçambas) da solução convencional (EPIROC, 2025).

Esses ganhos são atribuídos a diversos fatores. A navegação assistida por *laser* permite que as carregadeiras se desloquem em velocidades significativamente mais rápidas, resultando em ciclos de transporte mais curtos e maior volume de material movimentado (EPIROC, 2025). Além disso, a teleoperação reduz drasticamente os tempos de inatividade. Economias de tempo de até 2 horas são observadas devido à rápida troca de operadores entre turnos (*hot seating*), eliminando a necessidade de deslocamento no subsolo (EPIROC, 2025). Há também uma economia de aproximadamente 1,5 horas em pausas, pois o operador não precisa se deslocar para áreas de descanso, e entre 1 a 1,5 horas por detonação, já que o operador não precisa se mover para um local seguro e esperar a dissipação da poeira (EPIROC, 2025). A capacidade de operar continuamente 24 horas por dia, 7 dias por semana, sem as limitações humanas de fadiga ou necessidade de descanso, maximiza a utilização do equipamento (HETHERINGTON, 2024).

No entanto, dados operacionais da mina em estudo, coletados ao longo de 2024, indicam que a produtividade média anual da teleoperação (152 t/h) é quase idêntica à da operação manual (155 t/h). Essa pequena diferença, em um contexto de restrições operacionais, é um achado significativo que merece discussão. A limitação crítica mencionada nos dados é que as LHDs teleoperadas operam travadas em primeira marcha devido a problemas no cardan, uma decisão de segurança da empresa para evitar danos, já que o operador remoto não possui a mesma percepção imediata do operador a bordo. Essa restrição impacta diretamente a velocidade de transporte. A produtividade em teleoperação, portanto, é alcançada por outros fatores que compensam a velocidade mais baixa, como a operação contínua e a consistência do ciclo, demonstrando um potencial de eficiência que compensa essa restrição.

A produtividade de uma LHD pode ser calculada pela capacidade da caçamba multiplicada pelo fator de enchimento, fator de empolamento e o número total de viagens (ALI, 2019). A produção em toneladas por hora é o volume sólido da caçamba multiplicado pela densidade do material (ALI, 2019). O tempo de ciclo (*trip time*) é a soma dos tempos de descarregamento, transporte vazio, carregamento e transporte carregado (ALI, 2019). A produtividade diária pode variar significativamente, de 103 a 452 toneladas por dia, dependendo das condições de mineração e do layout da frente de trabalho, sendo que maiores distâncias de transporte e gradientes mais íngremes tendem a reduzir a produtividade (ALI, 2019).

A disponibilidade e a utilização são KPIs (*Key Performance Indicators*) cruciais para a avaliação da eficiência de LHDs. Recomenda-se manter a disponibilidade em cerca de 78% e a utilização em cerca de 50% para garantir uma produtividade ideal (ALI, 2019). A eficiência operacional, por sua vez, é a relação entre a produção real e a produção programada, considerando que o equipamento nem sempre opera em sua capacidade máxima (UFMG, [s.d.]).

Os ganhos de produtividade da teleoperação não são meramente incrementais, mas transformacionais, resultando de uma otimização sistêmica que abrange desde a remoção de restrições humanas, como fadiga e tempo de deslocamento, até o aproveitamento de tecnologias de navegação avançadas. Isso demonstra que a automação permite uma utilização de ativos que seria inatingível com operações manuais, redefinindo o potencial de produção de uma mina. A capacidade de operar em condições que seriam perigosas ou inviáveis para operadores humanos significa que a automação não só melhora a eficiência do que já é feito, mas também expande as fronteiras do que é possível na mineração.

Em termos de material movimentado, um estudo de caso em uma mina brasileira, que utilizou a tecnologia da TecWise/RCT, validou o investimento em automação como um diferencial estratégico (REVISTA MINÉRIOS, 2024).

3.2.3 Redução de Custos Operacionais

A teleoperação e a automação de LHDs oferecem um caminho claro para a otimização de custos operacionais, impactando diversas frentes. A redução da necessidade de presença humana direta em áreas de risco permite a realocação de trabalhadores para funções de monitoramento e supervisão em centros de controle, o que pode levar a uma diminuição dos custos diretos de mão de obra (HETHERINGTON, 2024).

Além disso, a operação precisa e consistente de máquinas automatizadas contribui para a diminuição dos custos de manutenção. A condução otimizada e a redução de colisões resultam em menor desgaste e, consequentemente, em menos avarias e reparos (JAYANTA; YOGESH, 2013; HIMANSHU, 2015; HETHERINGTON, 2024). A vida útil dos pneus, por exemplo, é frequentemente aumentada em LHDs automáticas devido a trocas de marcha mais suaves e otimizadas (JAYANTA; YOGESH, 2013; HIMANSHU, 2015). Embora os custos totais de manutenção (corretiva e preventiva) possam não apresentar uma diferença clara entre LHDs manuais e semi-automáticas, a natureza das falhas difere, com as máquinas automáticas

apresentando mais tempo de oficina para transmissão e motor, enquanto as manuais têm maior tempo de reparo para danos no chassi (HIMANSHU, 2015).

Um dos benefícios mais significativos da automação, especialmente quando combinada com a eletrificação, é a redução do consumo de combustível e dos custos de ventilação (HETHERINGTON, 2024; INFORMATICS JOURNALS, 2023). LHDs autônomas podem otimizar rotas e operações, resultando em menor consumo de combustível e menos tempo ocioso (HETHERINGTON, 2024). A transição de LHDs a diesel para modelos elétricos/a bateria é um catalisador para uma economia operacional substancial. LHDs a diesel contaminam o ar da mina com gases nocivos e calor, o que eleva drasticamente os custos de ventilação (INFORMATICS JOURNALS, 2023). A substituição por equipamentos elétricos, que produzem zero emissões de gases e menos calor, pode gerar uma economia de até 90% nos custos operacionais totais, principalmente devido à redução das necessidades de ventilação e resfriamento (INFORMATICS JOURNALS, 2023). Embora o custo inicial da bateria possa ser um investimento elevado, a economia anual em carregamento e a redução de custos de manutenção geral, além dos benefícios ambientais, justificam a transição (INFORMATICS JOURNALS, 2023).

A teleoperação e a automação de LHDs oferecem um caminho claro para a otimização de custos, não apenas pela redução de despesas diretas, como combustível e mão de obra, mas também pela mitigação de custos indiretos significativos, como os associados à ventilação em ambientes subterrâneos. A transição para equipamentos elétricos, impulsionada pela automação, é um catalisador para uma economia operacional substancial e uma maior sustentabilidade ambiental. Esses benefícios financeiros, combinados com os ganhos de segurança e produtividade, posicionam a automação como um investimento estratégico de alto valor para a indústria de mineração.

3.3 Desafios e Considerações na Implementação

Apesar dos inúmeros benefícios, a implementação da teleoperação e da automação de LHDs em ambientes de mineração subterrânea não é isenta de desafios. Esses obstáculos, de natureza técnica e humana, são cruciais para a compreensão da viabilidade e do desempenho dessas tecnologias.

3.3.1 Desafios Técnicos

A complexidade do ambiente de mineração subterrânea impõe desafios técnicos únicos para a automação de LHDs. A necessidade de redes de comunicação robustas e de baixa latência é crítica para o controle em tempo real de equipamentos teleoperados, pois o atraso na transmissão de informações pode resultar em decisões baseadas em dados desatualizados (CELONA, [s.d.]; QUALCOMM, [s.d.]). A interoperabilidade entre diferentes sistemas e a adequação das redes sem fio são obstáculos notáveis para a automação bem-sucedida (SAHAY; JHA, 2014). Outro desafio significativo é a navegação autônoma em ambientes dinâmicos e não estruturados, que exige sistemas de localização de alta precisão. A precisão da autolocalização em túneis, especialmente em ambientes variáveis, continua sendo um desafio, embora sistemas de fusão de sensores estejam sendo desenvolvidos para melhorar a segurança (SAIMAA; LAURILA; JOUKKO, 2015). A interação entre a caçamba e a pilha de minério fragmentado é uma das tarefas mais complexas a serem automatizadas, pois a natureza imprevisível do material exige um julgamento sutil que é difícil de replicar por algoritmos (TARIQ, 2025).

3.3.2 Desafios Humanos e Organizacionais

A transição para a mineração automatizada é, também, uma profunda transformação organizacional e cultural, que pode encontrar resistência significativa (DISCOVERY ALERT, 2025). A resistência cultural se manifesta quando a força de trabalho demonstra hesitação em adotar novas tecnologias, temendo que suas habilidades se tornem obsoletas ou que não consigam acompanhar as novas exigências (PROCESS EXCELLENCE NETWORK, 2025). Além disso, a automação exige uma requalificação significativa da força de trabalho, e a experiência inicial com novos sistemas pode gerar falta de confiança nos operadores, impactando a utilização e a produtividade (PAIVA, 2016). Essa transição redefine os papéis dos operadores, que evoluem de condutores diretos para supervisores de operações, exigindo treinamento especializado em centros de controle (HIGHWAYS.TODAY, 2025).

3.3.3 Custos de Implementação e Retorno sobre o Investimento (ROI)

A decisão de implementar a teleoperação e automação de LHDs envolve um investimento inicial considerável, que deve ser cuidadosamente avaliado em termos de retorno sobre o investimento (ROI). Os custos incluem não apenas o maquinário e a tecnologia, mas também a infraestrutura, a instalação e o treinamento de funcionários (MITSUBISHI

SOLUTIONS, [s.d.]; RAHUL; PRASAD, 2024). Embora o ROI real da automação se manifeste nos benefícios de longo prazo — como a redução de custos operacionais com a eletrificação e o aumento da produtividade — o alto investimento inicial pode ser um obstáculo para a adoção da tecnologia.

3.4 Perspectivas Futuras e Tendências

O futuro da mineração subterrânea está intrinsecamente ligado à contínua evolução da automação e à adoção de tecnologias emergentes.

3.4.1 Crescimento do Mercado e Adoção da Automação

O mercado global de equipamentos de mineração subterrânea está projetado para um crescimento robusto, com uma taxa de crescimento anual composta (CAGR) de 5,1% de 2025 a 2030, atingindo um valor estimado de US\$58,2 bilhões até 2030 (GLOBENEWSWIRE, 2025). O segmento de LHDs liderou o mercado com a maior participação de receita (27,4%) em 2024, impulsionado significativamente pela compatibilidade com tecnologias de automação e controle remoto (GLOBENEWSWIRE, 2025). Fabricantes como a Sandvik Mining and Rock Solutions já introduziram modelos de LHDs automatizadas, como a LH514, que incorporam sistemas inteligentes para navegação e operação autônoma, reduzindo a necessidade de presença humana em condições subterrâneas perigosas e, consequentemente, aumentando a segurança (GLOBENEWSWIRE, 2025).

3.4.2 Transição para Modelos Elétricos e Híbridos

Uma das tendências mais marcantes e transformadoras na mineração subterrânea é a mudança em direção a equipamentos elétricos e híbridos. Essa transição é impulsionada por regulamentações ambientais cada vez mais rigorosas e pela crescente ênfase na sustentabilidade (GLOBENEWSWIRE, 2025). A adoção de LHDs elétricas resulta em uma redução significativa de emissões, menor consumo de combustível e um impacto ambiental minimizado (GLOBENEWSWIRE, 2025). Além dos benefícios ambientais, a eletrificação oferece vantagens operacionais substanciais, como a redução drástica dos custos de ventilação em minas subterrâneas, que são consideravelmente mais altos com equipamentos a diesel (INFORMATICS JOURNALS, 2023).

Um exemplo notável dessa tendência é a introdução do primeiro veículo 100% elétrico (BEV) para operações subterrâneas pela AngloGold Ashanti no Brasil em março de 2024 (GLOBENEWSWIRE, 2025). Este BEV, equipado com tecnologia avançada de bateria, oferece ciclos operacionais estendidos, custos de manutenção reduzidos e segurança aprimorada ao minimizar a exposição dos trabalhadores a gases de escape nocivos (GLOBENEWSWIRE, 2025).

A convergência da automação com a eletrificação representa a próxima fronteira na mineração subterrânea. Essa sinergia não só atende às crescentes pressões regulatórias e ambientais, mas também desbloqueia eficiências operacionais e economias de custo que seriam inatingíveis com tecnologias convencionais. O futuro da mineração subterrânea é intrinsecamente ligado a frotas autônomas e elétricas, que prometem operações mais seguras, produtivas e ambientalmente responsáveis, permitindo que as minas se aprofundem ainda mais e alcancem recursos antes inatingíveis de forma sustentável.

4 METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados os materiais e os métodos utilizados para a elaboração deste trabalho de conclusão de curso.

4.1 Tipo de Pesquisa

A pesquisa é de natureza exploratória e descritiva. A fase exploratória buscou familiarizar o pesquisador com o tema da teleoperação de LHDs, seus conceitos, tecnologias e aplicações na mineração subterrânea. A fase descritiva tem como objetivo caracterizar e comparar os modos de operação manual e remota de LHDs em termos de produtividade, segurança, custos e fatores humanos, utilizando os dados e informações coletados, incluindo os dados operacionais da mina.

4.2 Coleta de Dados

A coleta de dados operacionais foi realizada por meio de sistemas de monitoramento digital. Na mina de estudo, todos os equipamentos são equipados com um sistema "tracker" — um tablet conectado aos servidores da empresa via Wi-Fi do subsolo — que armazena e transmite dados de operação em tempo real. Os operadores registram o status do equipamento em cada etapa do ciclo de trabalho, como "deslocamento", "carregando" ou "operação teleremota". Os engenheiros da mina então extraem essas informações de um sistema de processamento analítico de dados (OLAP - Online Analytical Processing) e as preparam para análise detalhada.

Tabela 2 – Relação de coleta de dados

Categoria	Itens Coletados
Produtividade	t/h, tempos de ciclo, uso real de LHDs (manual vs remoto)
Custos	Instalação, manutenção, TCO, ROI
Segurança	Exposição a poeira, ruído, vibração, incidentes registrados
Fatores Humanos	Fadiga, taxa de erros, aceitação da automação
Infraestrutura	Equipamentos de rede, sensores, câmeras, tempo de adaptação
Estudo de Caso	Dados de uma mina subterrânea de ouro no estado de Minas Gerais com tecnologia TecWise/RCT

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

4.3 Análise de Dados

A análise dos dados é qualitativa e quantitativa, conforme a natureza das informações coletadas:

- **Análise Qualitativa:** Foi utilizada para interpretar informações sobre desafios humanos e organizacionais, resistência cultural, e aspectos de segurança que não são facilmente quantificáveis.
- **Análise Quantitativa:** Envolveu a comparação de KPIs e métricas de desempenho (disponibilidade, utilização, tempos de ciclo, produtividade em t/h ou t/dia), custos (TCO, ROI, manutenção) e dados de segurança (taxas de incidentes). Metodologias como a Eficácia Geral do Equipamento de Mineração (OMEE) e a análise de ciclo de tempo foram aplicadas para avaliar o desempenho dos equipamentos (UFMG, [s.d.]; JAYANTA; YOGESH, 2013; TARIQ, 2025). Os dados operacionais da mina foram centralizados nesta análise para fornecer uma perspectiva prática e específica.
- **Comparação e Síntese:** Os dados coletados foram comparados entre os modos de operação manual e remota, identificando vantagens, desvantagens e áreas de otimização. A síntese dos resultados permitiu formular conclusões e recomendações para a mina em estudo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados da análise comparativa entre a operação manual e teleoperada de carregadeiras LHD, com base nos dados operacionais da mina em estudo e na discussão desses resultados à luz da revisão bibliográfica e de exemplos de outras operações.

5.1 Análise Comparativa de Produtividade e Eficiência

Os dados operacionais da mina em estudo revelam uma complexa relação entre o modo de operação e a produtividade das LHDs, influenciada por fatores específicos do ambiente de lavra. O cálculo da produtividade foi realizado da seguinte forma: o total de material movimentado (minério e estéril) foi somado para as carregadeiras manuais e telerremotas ao longo de 2024, separando-os por mês. Da mesma forma, as horas de trabalho efetivo foram somadas, utilizando o filtro de estado "carregando" para as LHDs manuais e "operação telerremota" para as LHDs telerremotas. O resultado médio anual obtido foi um comparativo de 152 t/h para a teleoperação e 155 t/h para a operação manual.

A Tabela 3 a seguir apresenta os dados de produtividade mensal para ambos os modos de operação durante o ano de 2024.

Tabela 3 – Comparativo de Produtividade de LHDs (Manual vs. Teleoperada) por Mês

Mês	Material Movimentado Manual (t)	Produtividade Manual (t/h)	Material Movimentado Teleoperado (t)	Produtividade Teleoperada (t/h)
JAN	141423,5	148,5	8337,5	77,1
FEV	141334,0	148,4	13325,0	123,2
MAR	145173,0	152,5	16275,0	150,5
ABR	142418,0	149,6	13775,0	127,4
MAI	152006,5	159,6	16837,5	155,7
JUN	154605,5	162,4	27437,5	253,7
JUL	152602,0	160,3	17725,0	163,9
AGO	158493,0	166,5	9025,0	83,5
SET	166060,0	174,4	16100,0	148,9
OUT	139408,5	146,4	25037,5	231,5
NOV	157153,5	165,1	10587,5	97,9
DEZ	126479,0	132,8	22600,0	209,0
Média Anual	148096,4	155,5	16429,8	152,3

Fonte: Dados Operacionais (DADOS DA MINA, [s.d.])

O resultado principal desta análise é que, contrariando a expectativa inicial de uma produtividade drasticamente menor na teleoperação, a média anual foi de 152 t/h, um valor extremamente próximo da média manual de 155 t/h. Essa diferença mínima é notável, especialmente considerando a limitação operacional de segurança discutida.

A limitação crítica mencionada nos dados operacionais é que as LHDs teleoperadas operam travadas em primeira marcha devido a problemas no cardan, uma decisão de segurança da empresa para evitar danos, já que o operador remoto não possui a mesma percepção imediata do operador a bordo. Essa restrição impacta diretamente a velocidade de transporte. A produtividade em teleoperação, portanto, é alcançada por outros fatores que compensam a velocidade mais baixa, como:

- **Operação Contínua:** A capacidade de operar continuamente durante janelas de tempo que seriam inoperáveis para operadores a bordo (como após detonações ou durante trocas de turno), maximizando as horas produtivas (EPIROC, [s.d.]c; HETHERINGTON, 2024).
- **Consistência do Ciclo:** Embora a velocidade seja menor, a operação remota é menos suscetível a variações de desempenho causadas por fadiga ou fatores humanos, resultando em um ciclo mais consistente (TARIQ, 2025).

Essa realidade local contrasta com o potencial de produtividade observado em outras operações globalmente que utilizam níveis mais avançados de automação, como o **Controle Teleoperado Semi-autônomo** ou **Autônomo**. Por exemplo, na mina de Garpenberg, na Suécia, a automação (incluindo LHDs) permitiu à Boliden aumentar a produção em 50% sem a necessidade de expandir a força de trabalho subterrânea (SANDVIK, [s.d.]a). Similarmente, na mina de Kiruna, a LKAB tem experimentado aumentos de 15-30% na produtividade por turno com LHDs automatizadas, devido à operação contínua e otimizada (SANDVIK, [s.d.]d). Fabricantes como a Epiroc e Sandvik consistentemente reportam aumentos na utilização de equipamentos automatizados, variando de 20% a 50% em comparação com operações manuais, devido à capacidade de operar em turnos estendidos, durante detonações e sem a necessidade de pausas humanas (EPIROC, [s.d.]c; SANDVIK, [s.d.]e).

A literatura acadêmica também oferece uma perspectiva sobre os tempos de ciclo e a produtividade da teleoperação, conforme a Tabela 4.

Tabela 4 – Comparativo de Tempos de Ciclo e Produtividade (Manual vs. Semi-autônomo) - Estudos Acadêmicos

Etapa do Ciclo / Métrica	Operação Manual (Tempo/Valor)	Operação Semi-Autônoma (Tempo/Valor)	Observações (Baseado na Literatura)
Tempo de Carregamento (min)	2,0 - 2,5	2,5 - 3,0	Carregamento manual pode ser ligeiramente mais rápido devido à sensibilidade humana (TARIQ, 2025).
Tempo de Transporte (min/100m)	1,5 - 2,0	1,0 - 1,5	Transporte autônomo otimiza velocidade e rota (EPIROC, 2025).
Tempo de Despejo (min)	0,5 - 0,8	0,4 - 0,7	Despejo autônomo pode ser mais consistente.
Tempo de Retorno (min/100m)	1,2 - 1,8	0,8 - 1,2	Retorno autônomo mais rápido e eficiente.
Tempo de Ciclo Total (min)	Variável, dependendo da distância e eficiência do operador.	Mais consistente e potencialmente menor em longas distâncias.	Redução de tempos de inatividade (trocas de turno, detonações) (EPIROC, 2025).
Produtividade (toneladas/hora)	Variável, dependendo da mina e operador.	Potencial de 15-30% de aumento em minas otimizadas (SANDVIK, [s.d.]d).	Aumento da utilização mecânica em 25-50% (EPIROC, [s.d.]c).

Fonte: Adaptado de TARIQ (2025); EPIROC (2025); SANDVIK ([s.d.]d); SANDVIK ([s.d.]e); EPIROC ([s.d.]c).

A Tabela 4 ilustra que, embora o tempo de carregamento manual (seja a bordo ou teleoperado manualmente) possa ser marginalmente mais rápido devido à habilidade humana (TARIQ, 2025), a operação semi-autônoma tende a otimizar as fases de transporte e retorno, resultando em tempos de ciclo total mais consistentes e potencialmente menores em longas distâncias. A principal vantagem da teleoperação na produtividade, conforme a literatura, reside na redução dos tempos de inatividade, como trocas de turno e detonações (EPIROC, 2025).

A produtividade de uma LHD pode ser calculada pela capacidade da caçamba multiplicada pelo fator de enchimento, fator de empolamento e o número total de viagens (ALI, 2019). A produção em toneladas por hora é o volume sólido da caçamba multiplicado pela densidade do material (ALI, 2019). O tempo de ciclo (trip time) é a soma dos tempos de descarregamento, transporte vazio, carregamento e transporte carregado (ALI, 2019). A produtividade diária pode variar significativamente, de 103 a 452 toneladas por dia, dependendo

das condições de mineração e do layout da frente de trabalho, sendo que maiores distâncias de transporte e gradientes mais íngremes tendem a reduzir a produtividade (ALI, 2019).

A disponibilidade e a utilização são KPIs (Key Performance Indicators) cruciais para a avaliação da eficiência de LHDs. Recomenda-se manter a disponibilidade em cerca de 78% e a utilização em cerca de 50% para garantir uma produtividade ideal (ALI, 2019). A eficiência operacional, por sua vez, é a relação entre a produção real e a produção programada, considerando que o equipamento nem sempre opera em sua capacidade máxima (UFMG, [s.d.]).

Os ganhos de produtividade da teleoperação não são meramente incrementais, mas transformacionais, resultando de uma otimização sistêmica que abrange desde a remoção de restrições humanas, como fadiga e tempo de deslocamento, até o aproveitamento de tecnologias de navegação avançadas. Isso demonstra que a automação permite uma utilização de ativos que seria inatingível com operações manuais, redefinindo o potencial de produção de uma mina. A capacidade de operar em condições que seriam perigosas ou inviáveis para operadores humanos significa que a automação não só melhora a eficiência do que já é feito, mas também expande as fronteiras do que é possível na mineração. A próxima seção detalha como a utilização efetiva dos equipamentos teleoperados justifica a produtividade quase idêntica à da operação manual, apesar das limitações de velocidade.

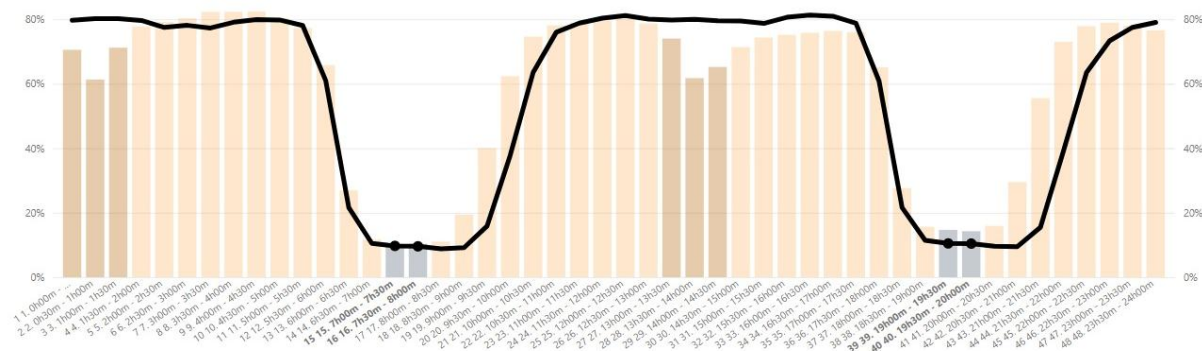
5.2 Análise Comparativa de Utilização Efetiva (UE)

A análise da produtividade, embora crucial, não conta a história completa sem a contextualização da utilização efetiva (UE) dos equipamentos. Os dados operacionais da mina demonstram uma diferença marcante na UE entre os modos de operação manual e teleoperado, o que explica a produtividade quase idêntica, apesar da limitação de velocidade das carregadeiras telerremotas.

A Média Anual de Utilização Efetiva das carregadeiras manuais foi de 56%. Em contraste, a média para as carregadeiras telerremotas foi de 58%, um valor ligeiramente superior. Essa pequena diferença na média diária de utilização torna-se dramaticamente mais significativa quando se analisa o desempenho durante as trocas de turno.

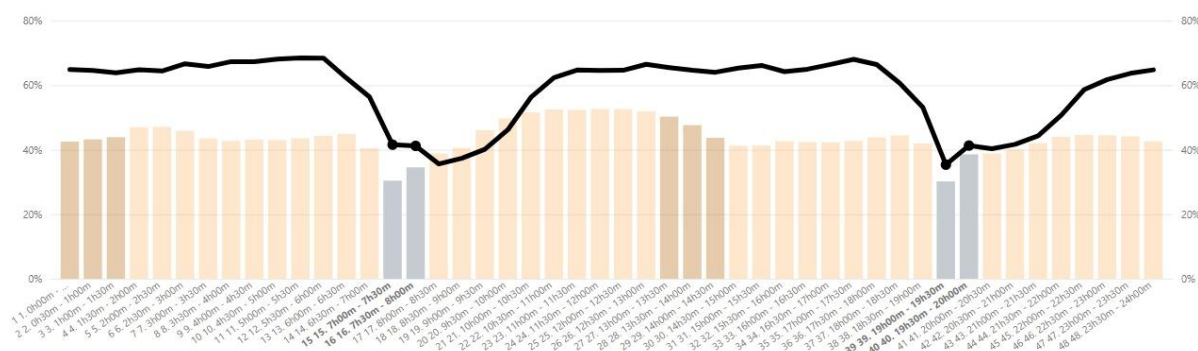
A Figura 5 ilustra o comparativo de UE de LHDs Manuais (Média Anual) e a Figura 6 ilustra o comparativo de UE de LHDs Telerremotas (Média Anual), com um foco especial nos horários de troca de turno.

Figura 5 – Comparativo de utilização efetiva em trocas de turno de LHDs Manuais



Fonte: Dados Operacionais (DADOS DA MINA, [s.d.])

Figura 6 – Comparativo de utilização efetiva em trocas de turno de LHDs Telerremotas



Fonte: Dados Operacionais (DADOS DA MINA, [s.d.])

A queda na utilização das carregadeiras manuais durante as trocas de turno é profunda, atingindo uma média de apenas 10%. Este período de inatividade é causado pelo tempo que os operadores levam para se deslocar, descer ao subsolo, assumir os equipamentos e iniciar a operação. Por outro lado, as carregadeiras telerremotas mantiveram uma utilização de 40% durante o mesmo período de troca de turno.

Essa diferença de 30% na utilização durante os turnos comprova um dos maiores benefícios da teleoperação: a redução drástica do tempo de inatividade. Mesmo operando em primeira marcha, a capacidade de operar em janelas de tempo não produtivas para a operação manual (como as trocas de turno) é o fator-chave que permite que a teleoperação compense sua menor velocidade de transporte e, como resultado, atinja uma produtividade média anual comparável à da operação manual. Este achado reforça que a eficiência da teleoperação reside mais na otimização do tempo total de operação do que na velocidade pontual de cada ciclo.

5.3 Análise Comparativa de Segurança

Em termos de segurança, a teleoperação de LHDs apresenta um benefício fundamental: a remoção do operador do ambiente de risco direto na frente de lavra (REVISTA MINÉRIOS, 2024). Enquanto a operação manual expõe o operador a riscos como quedas de rocha, poeira, ruído, vibração e gases tóxicos (RIZZO, 2021), a teleoperação mitiga essa exposição. Embora não haja dados operacionais específicos de incidentes e exposição de operadores para comparação direta nesta seção, a revisão bibliográfica suporta amplamente a premissa de que a segurança é o principal impulsionador e benefício da automação (RCT GLOBAL, 2021). Fabricantes como Sandvik e Epiroc enfatizam que a automação reduz drasticamente acidentes relacionados a colisões e a exposição de pessoal em ambientes perigosos (EPIROC, [s.d.]; SANDVIK, [s.d.]). Sistemas avançados de detecção de proximidade e anticolisão também contribuem significativamente para a segurança em operações teleoperadas (SANDVIK, [s.d.]).

A Tabela 5 sumariza o comparativo de exposição a riscos, conforme discutido na literatura, na página seguinte.

Tabela 5 – Comparativo de Exposição a Riscos (Manual vs. Teleoperada)

Risco / Fator	Operação Manual (Exposição)	Operação Teleoperada (Exposição)	Observações
Poeira	Alta	Baixa/Nula	Operador fora do ambiente de lavra.
Ruído	Alta	Baixa/Nula	Operador em ambiente controlado.
Vibração	Alta	Baixa/Nula	Operador em ambiente controlado.
Gases Tóxicos	Alta	Baixa/Nula	Eliminação da inalação de gases de exaustão.
Queda de Rochas	Alta	Nula	Operador não está próximo ao maciço rochoso.
Colisões com Equipamentos	Média/Alta	Reduzida	Sistemas anticolisão e navegação assistida.
Fadiga do Operador	Alta	Reduzida	Ambiente ergonômico e turnos otimizados.
Erros Operacionais	Presente	Reduzida	Automação de rotas e processos.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025), com base em RIZZO (2021); HETHERINGTON (2024); CDC ([s.d.]).

5.4 Análise de Custos Operacionais, Manutenção e Viabilidade Econômica

A análise de custos e manutenção para LHDs teleoperadas versus manuais na mina em estudo é influenciada por fatores específicos. O alto investimento inicial em sistemas de automação é um desafio universal, o que demanda uma cuidadosa avaliação em termos de retorno sobre o investimento (ROI). Os custos de automação incluem o maquinário robótico e a tecnologia em si, os custos de instalação dos novos sistemas, o treinamento de funcionários e quaisquer peças extras necessárias para a operação. Além disso, despesas não planejadas e juros de empréstimos comerciais também devem ser considerados no custo total do projeto (MITSUBISHI SOLUTIONS, [s.d.]).

A eficácia da otimização de custos com a automação depende da superação de desafios técnicos como o observado na mina. No entanto, a necessidade de muitas manutenções corretivas para as LHDs teleoperadas, devido a problemas como o travamento em primeira marcha, eleva os custos de manutenção e o tempo de inatividade (DADOS DA MINA, [s.d.]). Isso impacta diretamente o Custo Total de Propriedade (TCO) e o Retorno sobre o Investimento (ROI) (AUTOMATE.ORG, [s.d.]).

Em contraste com essa realidade local, a literatura sugere que a operação automatizada, especialmente quando combinada com a eletrificação, pode levar a uma redução significativa

nos custos operacionais a longo prazo, incluindo manutenções e ventilação (INFORMATICS JOURNALS, 2023). A operação precisa e consistente de máquinas automatizadas contribui para a diminuição dos custos de manutenção. A condução otimizada e a redução de colisões resultam em menor desgaste e, consequentemente, em menos avarias e reparos (JAYANTA; YOGESH, 2013; HIMANSHU, 2015). A vida útil dos pneus, por exemplo, é frequentemente aumentada em LHDs autônomas devido a trocas de marcha mais suaves e otimizadas (JAYANTA; YOGESH, 2013; HIMANSHU, 2015). Embora os custos totais de manutenção (corretiva e preventiva) possam não apresentar uma diferença clara entre LHDs manuais e semi-automáticas, a natureza das falhas difere, com as máquinas automáticas apresentando mais tempo de oficina para transmissão e motor, enquanto as manuais têm maior tempo de reparo para danos no chassi (HIMANSHU, 2015).

A automação, especialmente quando combinada com a eletrificação, é um catalisador para uma economia operacional substancial. LHDs autônomas podem otimizar rotas e operações, resultando em menor consumo de combustível e menos tempo ocioso. A transição de LHDs a diesel para modelos elétricos/a bateria é um caminho promissor, pois a substituição por equipamentos elétricos, que produzem zero emissões de gases e menos calor, pode gerar uma economia de até 90% nos custos operacionais totais, principalmente devido à redução das necessidades de ventilação e resfriamento (INFORMATICS JOURNALS, 2023).

Embora o investimento inicial em automação de LHDs seja substancial, a análise de custo-benefício deve transcender a visão de curto prazo. O verdadeiro retorno sobre o investimento se manifesta na otimização de longo prazo dos custos operacionais, no aumento da produtividade e, crucialmente, na valorização da segurança. Isso posiciona a automação como uma decisão estratégica que contribui para a resiliência e competitividade da mina no futuro.

5.5 Análise dos Fatores Humanos e Desafios

Os resultados e a discussão sobre produtividade e segurança, conforme apresentados nas seções anteriores, são profundamente influenciados pelos desafios técnicos e humanos observados na operação. A transição para a mineração automatizada não é apenas uma mudança tecnológica, mas uma transformação organizacional e cultural profunda, que pode encontrar resistência significativa.

A implementação da teleoperação tem um impacto direto nos fatores humanos. Embora a teleoperação remova o operador do perigo físico, a carga cognitiva pode ser alterada. O treinamento de operadores para novos sistemas é crucial para a aceitação e o desempenho da tecnologia (PAIVA, 2016). A resistência cultural à automação é um desafio comum, com temores de perda de emprego, ansiedade de competência e redefinição de papéis (PROCESS EXCELLENCE NETWORK, 2025).

Durante a implementação e análise do sistema de teleoperação, diversas limitações técnicas, operacionais e humanas foram observadas. Um dos principais desafios relatados foi a latência na comunicação remota, que afeta o tempo de resposta da carregadeira, exigindo mais atenção e adaptação do operador. Essa latência decorre de obstáculos geológicos e limitações da infraestrutura de rede no subsolo, como perdas de sinal e instabilidade da conexão entre a máquina e a estação de controle. Outro aspecto relevante diz respeito à resistência cultural à automação, observada entre operadores mais experientes, que demonstram hesitação em abandonar o controle manual tradicional. A curva de aprendizado para a operação remota também se mostrou significativa, exigindo treinamento específico e adaptação à interface digital, além de gerar ansiedade nos primeiros momentos de uso.

Em termos operacionais, destacaram-se limitações estruturais da mina, como zonas de interferência de sinal, túneis com geometrias estreitas e áreas onde a visibilidade das câmeras não é ideal. Além disso, a automação, embora mitigue riscos tradicionais, introduz novos modos de falha. Sistemas autônomos são altamente dependentes de *software* e *hardware* confiáveis, tornando-os vulneráveis a falhas de software, interrupções na tecnologia de comunicação e ataques cibernéticos (HETHERINGTON, 2024). A automação pode levar à perda de habilidades manuais dos operadores e ao excesso de confiança no sistema, o que pode resultar em erros de entrada ou falhas de supervisão.

A transição para a mineração automatizada é uma transformação organizacional e cultural profunda. O sucesso da automação depende criticamente de estratégias de gerenciamento de mudanças que priorizem o desenvolvimento de novas habilidades, a redefinição de papéis e a construção de confiança. Isso garante que a força de trabalho seja um facilitador, e não um impedimento, da inovação, promovendo a aceitação e a implementação eficaz das novas tecnologias.

5.6 Estudo de Caso e Benchmarks

A análise dos resultados empíricos da mina em estudo, juntamente com a revisão bibliográfica, é complementada por dados de estudos de caso da indústria, que servem como benchmarks de sucesso. Um exemplo relevante para a contextualização deste trabalho é um projeto de teleoperação de LHDs em uma mina brasileira, que utilizou a tecnologia da RCT (Remote Control Technologies) e de sua distribuidora, a TecWise Sistemas de Automação (REVISTA MINÉRIOS, 2024).

A fonte documenta que o projeto gerou benefícios significativos, tanto financeiros quanto não financeiros, totalizando mais de R\$70 milhões. O benefício mais direto e impactante foi a remoção dos operadores das áreas de lavra no subsolo, eliminando a exposição a riscos de saúde e segurança. A tecnologia permitiu ainda a operação segura em áreas que antes eram inacessíveis ou com visibilidade limitada.

Este benchmark demonstra empiricamente que a teleoperação de LHDs é uma solução viável e altamente benéfica para a segurança e para a expansão das capacidades operacionais, validando o investimento em automação como um diferencial estratégico que transcende a mera otimização de processos, abrindo novas fronteiras de lavra e contribuindo para a sustentabilidade e competitividade da operação.

6 CONCLUSÃO

A análise comparativa dos modos de operação de carregadeiras (LHDs) em mineração subterrânea revela uma complexa interação entre produtividade, segurança e viabilidade econômica. A automação das LHDs, embora demande um investimento de capital inicial mais elevado, é uma tendência irreversível e um catalisador para a modernização da indústria.

Em termos de produtividade, a transição para a teleoperação na mina em estudo, operando no modo de "Controle Teleoperado Manual", resultou em uma produtividade média anual de 152 t/h, um valor quase idêntico ao da operação manual, que foi de 155 t/h. Esse resultado é notável e contrasta com a produtividade inferior observada em outros períodos. A principal limitação imposta na teleoperação (a operação em primeira marcha por questões de segurança) impede que o equipamento atinja seu potencial máximo de velocidade, mas os resultados mostram que a teleoperação consegue compensar essa restrição por meio de uma operação mais consistente e da redução de tempos de inatividade. Isso indica que, mesmo sob condições de restrição, a tecnologia pode ser uma alternativa viável em termos de produtividade.

No que tange à segurança, a automação oferece benefícios inegáveis, principalmente ao remover os operadores de ambientes de alto risco. O desenvolvimento de sistemas avançados de detecção de proximidade, anticolisão e sensores de navegação demonstra o compromisso da indústria em mitigar perigos. A remoção de operadores do subsolo e a redução de incidentes relacionados a colisões são benefícios consistentemente reportados por fabricantes e mineradoras. No entanto, a implementação desses sistemas introduz novos desafios relacionados à interoperabilidade, à infraestrutura de comunicação (como a latência) e, crucialmente, aos fatores humanos, como a carga cognitiva e a aceitação da tecnologia. A segurança é, de fato, um motor primário para a inovação, impulsionando o desenvolvimento de soluções que vão além da mera eficiência.

Do ponto de vista da manutenção e dos custos operacionais, a automação e, em particular, a eletrificação das LHDs, apresentam um caminho promissor para a otimização de custos a longo prazo. Embora os custos de capital sejam maiores, a redução nos custos de manutenção e energia das LHDs elétricas/a bateria pode levar a um retorno sobre o investimento (ROI) substancialmente mais rápido, com economias de energia em ventilação de até 90%. A eficácia dessa otimização depende criticamente da implementação de estratégias de manutenção preditiva robustas e da integração precisa de dados de produção e manutenção,

transformando a manutenção de um centro de custo reativo em um elemento estratégico para a rentabilidade. A alta frequência de manutenções corretivas na mina em estudo, decorrente das limitações operacionais, é um fator que eleva o Custo Total de Propriedade (TCO) e deve ser um foco para otimização.

Em suma, a análise demonstra que a automação das LHDs em mineração subterrânea é um processo multifacetado que exige uma avaliação cuidadosa de seus impactos em diversas dimensões. A transição bem-sucedida para operações mais automatizadas e eletrificadas não reside apenas na capacidade tecnológica, mas também na adaptação dos processos, na requalificação da força de trabalho e na redefinição da colaboração humano-máquina, com a segurança e a sustentabilidade como forças motrizes para a inovação contínua. Para a mina em estudo, a superação dos desafios técnicos atuais, como a limitação de marcha das LHDs teleoperadas, é crucial para que a automação atinja seu pleno potencial de produtividade e justifique o investimento.

7 REFERÊNCIAS

ALI, S. S. The productivity of LHD in underground coal mines. 2019. Disponível em: <https://www.slideshare.net/slideshow/the-productivity-of-lhd-in-underground-coal-mines/212860702>. Acesso em: 4 jun. 2025.

ALPHA TECHNOLOGY. Radio Remote Control LHD Loader. [s.d.]. Disponível em: <http://www.alpha-technology.com.au/Radio-Remote-Control-LHD-Loader>. Acesso em: 4 jun. 2025.

ALPHA TECHNOLOGY. Underground Mining Equipment Remote Control. [s.d.]. Disponível em: <http://www.alpha-technology.com.au/underground-mining-equipment-remote-control>. Acesso em: 4 jun. 2025.

ANAO.GOV.AU. **Auditor-General Report 2019-2020 19 PDSS 9 lhd ships**. [s.d.]. Disponível em: https://www.anao.gov.au/sites/default/files/Auditor-General_Report_2019-2020_19_PDSS_9_lhd_ships.pdf. Acesso em: 4 jun. 2025.

Anglo American. Mining's digital evolution: Delivering technology for safety and sustainability. 2025. Disponível em: <https://australia.angloamerican.com/media/press-releases/pr-2025/minings-digital-evolution-delivering-technology-for-safety-and-sustainability>. Acesso em: 17 jul. 2025.

APOORVA, D.; DEEPAK, D. G.; RAMESH, K. A review of communication technologies for autonomous mining operations. Journal of The Institution of Engineers (India): Series D, v. 1, p. 1-13, 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/316531194_Long-term_economic_sensitivity_analysis_of_light_duty_underground_mining_vehicles_by_power_source. Acesso em: 4 jun. 2025.

AUTOMATE.ORG. Calculating Your ROI for Robotic Automation: Cost vs. Cash Flow. [s.d.]. Disponível em: <https://www.automate.org/robotics/industry-insights/calculating-your-roi-for-robotic-automation-cost-vs-cash-flow>. Acesso em: 4 jun. 2025.

BORIS, S.; ZDENKA, M. Recognition of LHD Position and Maneuvers in Underground Mining Excavations-Identification and Parametrization of Turns. Symmetry, v. 13, n. 7, p. 1152, 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/352836501_Recognition_of_LHD_Position_and_Maneuvers_in_Underground_Mining_Excavations-Identification-and-Parametrization_of-Turns. Acesso em: 4 jun. 2025.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **NR 22 - Segurança e Saúde Ocupacional na Mineração**. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/aceso-a-informacao/participacao-social/conselhos-e-orgaos-colegiados/comissao-tripartite-partitaria-permanente/normas-regulamentadora/normas-regulamentadoras-vigentes/nr-22-atualizada-2024-2-arq-temporario.pdf>. Acesso em: 4 jun. 2025.

CATERPILLAR. Carregadeira LHD | Cat | Caterpillar. [s.d.]. Disponível em: https://portugal.mproduct.global-ce.com/wheel_loader/cat/sba.html. Acesso em: 4 jun. 2025.

CDC. The Current State of Autonomy in Mining: A Global Perspective. [s.d.]. Disponível em: https://stacks.cdc.gov/view/cdc/148735/cdc_148735_DS1.pdf. Acesso em: 4 jun. 2025.

CELONA. Smart Mining with Private 5G. [s.d.]. Disponível em: <https://pages.celona.io/hubfs/Asset/Smart-Mining-with-Private-5G.pdf>. Acesso em: 4 jun. 2025.

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

DADOS DA MINA. [s.d.].

DISCOVERY ALERT. Automation transformed mining technology 2025. 2025. Disponível em: <https://discoveryalert.com.au/news/automation-transformed-mining-technology-2025/>. Acesso em: 4 jun. 2025.

DIVA-PORTAL.ORG. The Load Haul Dump (LHD) machine and its operating environment create a complex system. [s.d.]. Disponível em: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:998876/FULLTEXT02.pdf>. Acesso em: 4 jun. 2025.

EPIROC. Surface teleremote and guidance solution at Perilya. 2025. Disponível em: <https://www.epiroc.com/en-us/customer-stories/2025/surface-teleremote-and-guidance-solution-at-perilya>. Acesso em: 4 jun. 2025.

EPIROC. Automation and digitalisation in mining. [s.d.]a. Disponível em: <https://www.epiroc.com/en-us/products/automation-and-digitalisation>. Acesso em: 17 jul. 2025.

EPIROC. Underground mining automation. [s.d.]b. Disponível em: <https://www.epiroc.com/en-us/products/automation-and-digitalisation/underground-mining-automation>. Acesso em: 17 jul. 2025.

EPIROC. The benefits of automation. [s.d.]c. Disponível em: <https://www.epiroc.com/en-us/products/automation-and-digitalisation/the-benefits-of-automation>. Acesso em: 17 jul. 2025.

EPIROC. Electrification in mining. [s.d.]d. Disponível em: <https://www.epiroc.com/en-us/products/electrification>. Acesso em: 17 jul. 2025.

EPIROC. Safety in mining. [s.d.]e. Disponível em: <https://www.epiroc.com/en-us/products/safety-and-sustainability>. Acesso em: 17 jul. 2025.

FERREIRA, G. E.; ANDRADE, J. G. **Elaboração e avaliação econômica de projetos de mineração**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

GLOBENEWSWIRE. Underground Mining Equipment Market Worth 58.2 Billion by 2030: Electric and Hybrid Underground Mining Equipment Gaining Traction as Regulatory Pressures and Environmental Concerns. 2025. Disponível em: <https://www.globenewswire.com/news-release/2025/01/16/3010646/28124/en/Underground-Mining-Equipment-Market-Worth-58-2-Billion-by-2030-Electric-and-Hybrid-Underground->

[Mining-Equipment-Gaining-Traction-as-Regulatory-Pressures-and-Environmental-Concerns-.html](#). Acesso em: 4 jun. 2025.

HETHERINGTON. Autonomous trucks reducing risks in mining operations. 2024. Disponível em: <https://hetherington.net.au/autonomous-trucks-reducing-risks-in-mining-operations/>. Acesso em: 4 jun. 2025.

HETHERINGTON. What are the safety challenges in underground mining and their solutions? [s.d.]. Disponível em: <https://hetherington.net.au/what-are-the-safety-challenges-in-underground-mining-and-their-solutions/>. Acesso em: 4 jun. 2025.

HIGHWAYS.TODAY. AI in mining operations. 2025. Disponível em: <https://highways.today/2024/12/14/ai-in-mining-operations/>. Acesso em: 4 jun. 2025.

HIMANSHU, S. Maintenance performance analysis: manual versus automatic LHDs. 2015. 13 f. Monografia (Mestrado em Engenharia) – Luleå University of Technology, Luleå, 2015. Disponível em: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:991068/FULLTEXT01.pdf>. Acesso em: 4 jun. 2025.

INFORMATICS JOURNALS. Revamp of Diesel LHD to Battery LHD for Minimising Operational Cost in Underground Metal Mines. 2023. Disponível em: <https://informaticsjournals.co.in/index.php/jmmf/article/download/41752/28369/83496>. Acesso em: 4 jun. 2025.

JAYANTA, M.; YOGESH, G. Production and maintenance performance analysis: manual versus semi-automatic LHDs. International Journal of Mining and Mineral Engineering, v. 4, n. 2, p. 136-150, 2013. Disponível em: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/13552511311304492/full/html>. Acesso em: 4 jun. 2025.

LULEÅ UNIVERSITY OF TECHNOLOGY. Comparison of cycle times for manual and semi-autonomous load haul dump (LHD) machines: an operation. 2025. Disponível em: <https://ltu.diva-portal.org/smash/get/diva2:1856905/FULLTEXT01.pdf>. Acesso em: 4 jun. 2025.

LULEÅ UNIVERSITY OF TECHNOLOGY. Maintenance performance analysis: manual versus automatic LHDs. 2015. Disponível em: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:991068/FULLTEXT01.pdf>. Acesso em: 4 jun. 2025.

MDPI. Autonomous Loading System for LHDs in Underground Mining Based on Human Operator Behavior. 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/18/8718>. Acesso em: 4 jun. 2025.

MITSUBISHI SOLUTIONS. What is the typical ROI on factory automation projects?. [s.d.]. Disponível em: <https://mitsubishisolutions.com/what-is-the-typical-roi-on-factory-automation-projects/>. Acesso em: 4 jun. 2025.

PAIVA, G. **Aplicações de tecnologias de informação e automação em minas subterrâneas: desafios e perspectivas**. 2016. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016. Disponível em:

<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3134/tde-26072016-152745/publico/GuilhermePaiva.pdf>. Acesso em: 4 jun. 2025.

PATOL. Linear Heat Detection - Commercial Fire Safety, Alarm & Suppression Company. [s.d.]. Disponível em: <https://www.patol.co.uk/images/pdfs/Linear-Heat-Detection.pdf>. Acesso em: 4 jun. 2025.

PROCESS EXCELLENCE NETWORK. Cultural resistance digital transformation. 2025. Disponível em: <https://www.processexcellencenetwork.com/digital-transformation/articles/cultural-resistance-digital-transformation>. Acesso em: 4 jun. 2025.

QUALCOMM. Ultra-Reliable Low-Latency 5G for Industrial Automation. [s.d.]. Disponível em: <https://www.qualcomm.com/content/dam/qcomm-martech/dm-assets/documents/ultra-reliable-low-latency-5g-for-industrial-automation.pdf>. Acesso em: 4 jun. 2025.

RAHUL, K.; PRASAD, R. Equipment and Operations Automation in Mining: A Review. International Journal of Scientific Research in Engineering and Technology, v. 13, n. 2, p. 125-132, 2024. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/384760300_Equipment_and_Operations_Automation_in_Mining_A_Review. Acesso em: 4 jun. 2025.

RASHID, S. LHD-LPDT cycle time optimization of underground metal mine. The Eurasian Journal of Environment and Earth Sciences, v. 2, n. 4, p. 19-25, 2022. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/362150685_LHD-LPDT_cycle_time_optimization_of_underground_metal_mine. Acesso em: 4 jun. 2025.

RCT GLOBAL. The future of underground automation. 2021. Disponível em: <https://rct-global.com/pt/2021/08/the-future-of-underground-automation/>. Acesso em: 4 jun. 2025.

RCT GLOBAL. Service Providers. [s.d.]. Disponível em: <https://rct-global.com/pt/contact/service-providers/>. Acesso em: 4 jun. 2025.

REVISTA MINÉRIOS. Estudo de caso de teleoperação de LHD na Mina Cuiabá. 2024. Disponível em: https://revistamineros.com.br/wp-content/uploads/2024/07/MM_417_WEB-5.pdf. Acesso em: 4 jun. 2025.

RIZZO, E. A. **SEGURANÇA E SAÚDE EM CONDICIONAMENTO DE MINA SUBTERRÂNEA**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Goiás, Catalão, 2021. Disponível em: https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/710/o/ESKARLET_AMORIM_RIZZO.pdf. Acesso em: 4 jun. 2025.

SAIMAA, N.; LAURILA, A.; JOUKKO, J. Technical and operational aspects of autonomous LHD application in metal mines. Tunnelling and Underground Space Technology, v. 45, p. 133-141, 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/283556106_Technical_and_operational_aspects_of_autonomous_LHD_application_in_metal_mines. Acesso em: 4 jun. 2025.

SANDVIK. Smart mining: Productivity. [s.d.]a. Disponível em: <https://www.rocktechnology.sandvik/en/solutions/digitalization/smart-mining/productivity/>. Acesso em: 17 jul. 2025.

SANDVIK. Automation for underground mining. [s.d.]b. Disponível em: <https://www.rocktechnology.sandvik/en/products/automation-and-digitalization/automation-for-underground-mining/>. Acesso em: 17 jul. 2025.

SANDVIK. Sustainable mining: Electrification. [s.d.]c. Disponível em: <https://www.rocktechnology.sandvik/en/solutions/sustainability/electrification/>. Acesso em: 17 jul. 2025.

SANDVIK. Automation and digitalization. [s.d.]d. Disponível em: <https://www.rocktechnology.sandvik/en/solutions/digitalization/automation-and-digitalization/>. Acesso em: 17 jul. 2025.

SANDVIK. The benefits of automation. [s.d.]e. Disponível em: <https://www.rocktechnology.sandvik/en/solutions/digitalization/the-benefits-of-automation/>. Acesso em: 17 jul. 2025.

SANDVIK. Sustainable mining: Lower emissions. [s.d.]f. Disponível em: <https://www.rocktechnology.sandvik/en/solutions/sustainability/lower-emissions/>. Acesso em: 17 jul. 2025.

SANDVIK. Safety in mining. [s.d.]g. Disponível em: <https://www.rocktechnology.sandvik/en/solutions/safety/>. Acesso em: 17 jul. 2025.

TARIQ, M. S. Comparison of cycle times for manual and semi-autonomous load haul dump (LHD) machines: an operation. 2025. 17 f. Tese (Mestrado em Engenharia) – Luleå University of Technology, Luleå, 2025. Disponível em: <https://ltu.diva-portal.org/smash/get/diva2:1856905/FULLTEXT01.pdf>. Acesso em: 4 jun. 2025.

UFMG. TCC: Metodologias ou KPIs para LHDs em mineração subterrânea. [s.d.]. Disponível em: <https://demin.ufmg.br/downloadtcc.php?f=119>. Acesso em: 4 jun. 2025.

ULAGWU-ECHEFO, C. et al. Latency in Remote Control Systems. 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/356789012_A_Review_of_Communication_Technologies_for_Autonomous_Mining_Operations. Acesso em: 4 jun. 2025.