



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**ISABELLA MACHADO DIAS  
SABRINA FERREIRA LOPES**

**FRAMEWORK DE INTEGRAÇÃO ENTRE AS TECNOLOGIAS, PRINCÍPIOS E  
DIMENSÕES DOS PROJETOS DA I4.0 NO CONTEXTO DE UMA MINERADORA**

**JOÃO MONLEVADE**

**2021**

ISABELLA MACHADO DIAS  
SABRINA FERREIRA LOPES

**FRAMEWORK DE INTEGRAÇÃO ENTRE AS TECNOLOGIAS, PRINCÍPIOS E  
DIMENSÕES DOS PROJETOS DA I4.0 NO CONTEXTO DE UMA MINERADORA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Produção.

Orientadora: Dr<sup>a</sup>. Luciana Paula Reis

JOÃO MONLEVADE

2021

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

D541f Dias, Isabella Machado .  
Framework de integração entre as tecnologias, princípios e dimensões dos projetos da I4.0 no contexto de uma mineradora. [manuscrito] / Isabella Machado Dias. Sabrina Ferreira Lopes. - 2021.  
63 f.: il.: color.. + Quadro.

Orientadora: Profa. Dra. Luciana de Paula Reis.  
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.  
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Graduação em Engenharia de Produção .

1. Indústria mineral. 2. NET framework (Tecnologia de rede de computador). 3. Projetos . 4. Tecnologia. I. Lopes, Sabrina Ferreira. II. Reis, Luciana de Paula. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 658.5

Bibliotecário(a) Responsável: Flavia Reis - CRB6-2431



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Isabella Machado Dias e Sabrina Ferreira Lopes**

**Framework da integração entre as tecnologias, princípios e dimensões dos projetos da I4.0 no contexto de uma mineradora**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de bacharel

Aprovada em 09 de agosto de 2021

### Membros da banca

Dra. Luciana Paula Reis - Orientadora (Universidade Federal de Ouro Preto)  
Dr. June Marques Fernandes (Universidade Federal de Ouro Preto)  
Mestrando Júlio César Morais Fernandes (Universidade Federal de Ouro Preto)

Luciana Paula Reis, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 16/08/2021



Documento assinado eletronicamente por **Luciana Paula Reis, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 16/08/2021, às 22:22, 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](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0207549** e o código CRC **9E5F8F38**.

Dedicamos este trabalho a todos os que nos ajudaram ao longo desta caminhada.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus que permitiu que tudo isso acontecesse, ao longo de nossas vidas, e não somente nestes anos como universitárias, mas que em todos os momentos é o maior mestre que alguém pode conhecer.

A esta universidade, seu corpo docente, direção e administração que oportunizaram a janela que hoje vislumbramos um horizonte superior, eivado pela acendrada confiança no mérito e éticos aqui presentes.

A nossa orientadora Luciana, pelo suporte no pouco tempo que lhe coube, pelas suas correções e incentivos.

Agradecemos a todos os professores por nos proporcionar o conhecimento não apenas racional, mas a manifestação do caráter e afe0tividade da educação no processo de formação profissional, por tanto que se dedicaram a nós, não somente por terem nos ensinado, mas por terem nos feito aprender. A palavra mestre, nunca fará justiça aos professores dedicados aos quais sem nominar terão os nossos eternos agradecimentos.

A nossa família, pelo amor, incentivo e apoio incondicional. A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da nossa formação, o nosso muito obrigado.

“Todos os nossos sonhos podem se realizar, se  
tivermos a coragem de persegui-los.”  
(Walt Disney)

## RESUMO

A indústria 4.0 melhora significativamente a flexibilidade, qualidade, produtividade, custo e satisfação do cliente, transformando um sistema de manufatura centralizado em um sistema digital e descentralizado. Desta forma o presente trabalho tem como objetivo propor um framework para explicitar o relacionamento entre as tecnologias, princípios e dimensões de alguns projetos da I4.0 no contexto de uma mineradora. Para tanto, utilizou-se como método de pesquisa o estudo de caso e foram avaliados quatro projetos da I4.0 implantados. Durante a análise documental foi possível identificar três contribuições sendo elas: i) o framework de integração das tecnologias, princípios e dimensões ii) o modelo hierárquico das tecnologias iii) divisão das tecnologias em níveis.

**Palavras-chave:** Indústria 4.0. Barreira I4. 0. Indústria de Mineração. Tecnologia.

## **ABSTRACT**

Industry 4.0 significantly improves flexibility, quality, productivity, cost and customer satisfaction by transforming a centralized manufacturing system into a digital, decentralized system. Thus, the present work aims to propose a framework to explain the relationship between the technologies, principles and dimensions of some I4.0 projects in the context of a mining company. Therefore, the case study was used as a research method and four implemented I4.0 projects were evaluated. During the document analysis it was possible to identify three contributions, namely: i) the framework for integrating technologies, principles and dimensions ii) the hierarchical model of technologies iii) division of technologies into levels.

**Keywords:** Industry 4.0. Barrier I4.0. Mining Industry. Technology.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação da perfuratriz autônoma .....	30
Figura 2 – Trator de esteira de grande porte.....	31
Figura 3 – Apresentação da cabine remota.....	32
Figura 4 – Caminhão fora de estrada autônomo.....	33
Figura 5 – Sala COI.....	35
Figura 6 – Tecnologias da I4.0 presente nos projetos .....	37
Figura 7 - Princípios da I4.0 presentes nos projetos.....	40
Figura 8 - Desdobramento das dimensões por projeto .....	42
Figura 9 - Desdobramento das barreiras.....	44
Figura 10 – Conexão gestão de mudança e barreiras .....	48
Figura 11 - <i>Framework</i> de integração entre tecnologias, princípios e dimensões .....	50

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Tecnologias da I4.0 .....	17
Quadro 2 - Princípios da I4.0.....	19
Quadro 3 - Barreiras para implantação da I4.0.....	22
Quadro 4 – Coleta de dados.....	27
Quadro 5 – Perfuratriz Convencional x Autônoma .....	30
Quadro 6 – Trator de esteira convencional x Trator semiautônomo .....	32
Quadro 7 – Caminhão tripulado x Caminhão autônomo.....	34
Quadro 8 – Fluxo de informação descentralizado x COI.....	35

## LISTA DE SIGLAS

I4.0	Indústria 4.0
IoT	<i>Internet of things</i>
RFID	<i>Radio frequency identification</i>

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>12</b>
1.1 Problema de Pesquisa.....	12
1.2 Contextualização do Problema de Pesquisa.....	13
1.3 Objetivo Geral .....	13
1.4 Objetivos Específicos.....	14
1.5 Justificativa .....	14
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>15</b>
2.1 Indústria 4.0 .....	15
2.2 Tecnologias da I4.0 .....	16
2.3 Princípios da I4.0 .....	19
2.4 Dimensão da I4.0 .....	20
2.5 Barreiras da I4.0 .....	21
<b>3. METODOLOGIA.....</b>	<b>26</b>
<b>4. CASO PRÁTICO.....</b>	<b>29</b>
4.1 Projetos Mina Autônoma.....	29
4.1.1 Perfuratriz autônoma.....	29
4.1.2 Trator de Esteira de Grande Porte .....	31
4.1.3 Caminhão Fora de Estrada.....	33
4.2 Projeto COI.....	35
4.3 Tecnologia da I4.0.....	36
4.4 Princípios da I4.0 .....	40
4.5 Dimensões da I4.0 .....	42
4.6 Barreiras vivenciadas durante a implantação da I4.0 .....	43
4.7 Plano de gestão de mudança para gerenciar as barreiras da I4.0 .....	47
<b>5. DISCUSSÃO.....</b>	<b>50</b>
5.1 Framework de integração entre as tecnologias, princípios e dimensões da I4.0 .....	50
5.2 Barreiras da I4.0 .....	52
<b>6. CONCLUSÃO.....</b>	<b>53</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>56</b>
<b>APÊNDICE.....</b>	<b>62</b>
<b>Apêndice A - Questionário para mapear os processos de adoção da I4.0 .....</b>	<b>62</b>

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Problema de Pesquisa

Nos últimos anos, graças ao desenvolvimento contínuo da tecnologia e à inovação dos processos de manufatura, o cenário industrial global passou por profundas transformações (PEREIRA e ROMERO, 2017). Nesse sentido, surgiu o conceito de Indústria 4.0 (I4.0), que tem o objetivo de inovar os negócios por meio de tecnologias conectadas com as dimensões e princípios.

O crescimento exponencial de tecnologias, avanços na computação e a contínua adoção e promoção dessas tecnologias em muitos campos são essenciais para o desenvolvimento da I4.0 (ROZO, 2020). Também, graças ao caráter colaborativo do trabalho, a base técnica inclui o conceito de implementação progressiva, o que significa que o desenvolvimento e o aprimoramento de cada tecnologia trarão melhorias exponenciais às demais (NEO, 2018).

Portanto, para o desenvolvimento e implementação da I4.0, alguns princípios foram definidos para caracterizar as tecnologias que tendem a surgir. Esses princípios fornecem conhecimento sistemático e também ajudam as empresas a desenvolver e determinar soluções adequadas (HERMANN *et al.*, 2016).

Com aplicação da tecnologia e princípios da I4.0, a indústria usa sistema de produção eficiente e inteligente, alcançando alguma das 4 dimensões da I4.0 (manufatura inteligente, produtos e serviços inteligentes, cadeia de suprimentos inteligente e trabalho inteligente), caracterizando a transformação de negócio (HERMANN *et al.*, 2016).

Assim, a I4.0 melhora substancialmente a flexibilidade, qualidade, produtividade, custo e satisfação do cliente, transformando os sistemas de manufatura centralizados em sistemas digitais e descentralizados (SISHI *et al.*, 2020). Apesar de ter benefícios potenciais da I4.0, as organizações estão enfrentando obstáculos e desafios típicos na adoção de novas tecnologias e implementação bem-sucedida em seus modelos de negócios.

Algumas barreiras identificadas, por meio de revisão abrangente da literatura são: falta de força de trabalho qualificada e a necessidade de treinar a equipe para se adaptar às novas circunstâncias (MULLER e VOIG, 2017); falta de recursos financeiros (EROL, 2016) resistência organizacional (Von, 2017). Segundo Neto (2019), na indústria da mineração, as principais barreiras estão relacionadas às operações tradicionais e resistência organizacional, refletindo a mentalidade conservadora do setor.

Sirinanda (2019) acredita que o ramo será marcado por um modelo de negócio digital, desde que os líderes estejam engajados a superar os desafios, como a falta de estratégia digital, sustentabilidade e investimento em tecnologias promissoras. Desse modo, as empresas desse ramo que adotam a tecnologia digital e a análise de dados para otimizar as operações, obtêm vantagem competitiva sobre os concorrentes.

Logo, nota-se que as empresas possuem desafios significativos do ponto de vista lógico, organizacional e de gestão, para implementação da I4.0. Além dessas barreiras, há dificuldade na compreensão e aplicação das tecnologias, o que pode causar interpretações errôneas na utilização dos princípios e dimensões. Sendo assim, há a possibilidade das soluções tecnológicas adotadas por algumas empresas não estarem em consonância com os princípios e dimensões da I4.0.

Dessa forma, o presente trabalho tem como problema de pesquisa: Quais são as tecnologias, princípios e dimensões exploradas em quatro projetos da I4.0 de uma mineradora e como se dá o relacionamento entre eles? Quais são as principais barreiras enfrentadas pelos gestores dos projetos durante sua implementação?

## **1.2 Contextualização do Problema de Pesquisa**

A mineradora estudada começou a implantar, em 2016, um programa de transformação digital, com o objetivo de contribuir para a sustentabilidade de sua estratégia em longo prazo: ser uma empresa focada em segurança, produtividade e inovação.

Esse investimento permitirá à empresa promover a integração entre as áreas de negócio pelo mundo, reduzir custos, simplificar processos, aumentar a produtividade e a eficiência operacional e, alcançar os melhores índices de saúde e segurança através da adoção de novas tecnologias da I4.0.

Por ser muito recente a implantação dos novos projetos ligados à I4.0 ainda está sendo mapeadas e estudadas as barreiras decorrentes dessas mudanças tecnológicas. Inicialmente, é possível identificar as melhorias nos processos produtivos internos da mineradora trazidas pela nova revolução industrial.

## **1.3 Objetivo Geral**

Propor um framework para explicitar o relacionamento entre as tecnologias, princípios e dimensões de alguns projetos da I4.0 no contexto de uma mineradora.

## 1.4 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- a) Identificar e caracterizar os projetos;
- b) Identificar quais tecnologias são utilizadas nos projetos;
- c) Classificar os projetos em relação aos princípios da I4.0;
- d) Classificar os projetos em relação às dimensões da I4.0;
- e) Identificar as barreiras vivenciadas pelos projetos

## 1.5 Justificativa

De acordo com Sishi *et al.* (2020) a mineração é um dos principais contribuintes para o desenvolvimento econômico e humano. Logo, é necessário que o setor desenvolva sistematicamente a tecnologia, os princípios e as dimensões da I4.0 para melhorar a capacidade de produção, segurança, sustentabilidade e qualidade dos produtos. Assim agrega valor ao produto final, além de alcançar a excelência operacional.

Desse modo, é necessário realizar pesquisas aprofundadas sobre os projetos existentes em uma mineradora brasileira para compreender os desafios da implementação tecnológica, a fim de atenuar as barreiras e criar um ambiente empresarial mais favorável para o desenvolvimento e difusão da I4.0 na empresa.

Ademais, é necessário compreender como se dá o relacionamento entre as tecnologias da I4.0 dos projetos executados, pois ainda não se sabe como essas tecnologias realmente contribuem para implementar os princípios e as dimensões da I4.0.

Com isso, espera-se com este trabalho estruturar um framework apresentando as relações existentes entre as tecnologias da I4.0 a fim de contribuir para o fortalecimento dessa área emergente do conhecimento. Espera-se que os resultados possam ajudar a empresa a um entendimento detalhado do processo de adoção da I4.0 e as barreiras que impedem sua implementação.

Ademais, se espera que outras empresas sejam capazes de usufruir dos resultados e aplicá-los ao seu contexto. Vale ressaltar que as indústrias que desejam seguir o caminho da I4.0 devem avaliar suas capacidades e ajustar suas estratégias para implementá-las em circunstâncias apropriadas.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Indústria 4.0

Segundo Duarte (1999) em meados do século XIX a população em meio urbano na Europa convivia com os reflexos da Primeira Revolução Industrial, a qual foi marcada pela substituição do trabalho artesanal pelo assalariado com uso de máquinas a vapor, dando início a produção mecânica. A Segunda Revolução Industrial iniciou-se por volta do ano de 1850 com o advento da eletricidade e da linha de montagem, originando a produção em massa. Já em meados do século XX, surge a terceira revolução industrial, a qual foi impulsionada pelo desenvolvimento principalmente da robótica, genética, informação, telecomunicação e eletrônica.

Segundo Schwab (2019), em 2011 vivia-se no limiar da Quarta Revolução Industrial. A ruptura entre a terceira e quarta revolução industrial se dá por meio da sofisticação e integração entre as novas tecnologias, sendo elas, internet das coisas, presença marcante da inteligência artificial e aprendizagem automática, propiciando ainda mais a globalização do mundo. Essa nova era, também chamada de I4.0, engloba diversas outras áreas do conhecimento, tais como impressão 3D, nanotecnologia, robótica, sequenciamento genético, veículos autônomos dentre outros.

Dessa forma, a I4.0 busca soluções por meio da utilização das novas tecnologias para promover a inovação de seus produtos/serviços, bem como a otimização dos processos. Portanto é uma estratégia para alavancar a competitividade e produtividade, melhorando a performance diante o mercado. Assim, a I4.0 é uma tecnologia estratégica, a qual assegura no futuro a competitividade da empresa (SANTOS, 2018).

Portanto, alguns setores industriais se concentram na aplicação de conceitos I4.0, que são baseados no uso de sistemas industriais inteligentes com capacidade de tomada de decisão autônoma e apoiada por estruturas complexas de processamento e manipulação de dados (SUGAYAMA e NEGRELLI, 2016).

Moilanen (2020) percebeu que a indústria global de mineração é geralmente resistente à adoção de novas tecnologias, chamando esse fato de "síndrome da tecnologia comprovada". Visto que as empresas querem se beneficiar da nova tecnologia, mas devido à falta de experiência de longo prazo sobre sua eficácia, poucas assumem riscos. Esse método de gestão pode estar diretamente relacionado ao comportamento dos gestores que buscam minimizar os riscos escolhendo os métodos tradicionais com os quais estão familiarizados.

Mitchell (2019) acredita que, para alcançar aumentos de produtividade sustentáveis, as empresas de mineração precisam adotar uma abordagem de negócios integrada de ponta a ponta, do mercado à mina. Uma das principais etapas para atingir esse objetivo é adotar uma estratégia digital para reduzir a variabilidade na organização, aprimorar a abordagem ponta a ponta e melhorar a tomada de decisões.

Há perspectivas de desenvolvimento da transição da indústria de mineração para um sistema de controle inteligente com fatores humanos no projeto e desenvolvimento, bem como o sistema de engenharia de operação de mineração e seu monitoramento (BARNEWOLD e LOTTERMOSER, 2020). Sirinanda (2019) destacou que a implantação de novas tecnologias na cadeia da mineração ajudará a prolongar a vida útil da jazida e permitir que seja explorada e produzida com maior qualidade e pureza.

Sishi (2020) acredita que uma empresa de mineração precisa de visibilidade instantânea sobre a produção, qualidade, tempos de ciclo, status da máquina e outras variáveis operacionais importantes para alcançar operações ótimas e eficazes. Com isso, a implementação da tecnologia I4.0 na mineradora permitirá a comunicação contínua durante as operações otimizadas.

Diante disso, a partir da literatura foi estabelecido 18 tecnologias relacionadas ao contexto I4.0, tais como *Cyber-physical systems*, *Internet of Things* e *Cognitive computing*. No entanto, as definições e terminologias não são claras na academia e na indústria, o que torna difícil entender e aplicar esses conceitos (QIN *et al.*, 2016).

## 2.2 Tecnologias da I4.0

A indústria 4.0 está comprometida com a melhoria contínua nos que diz respeito à eficiência, produtividade, segurança e retorno do investimento. Com isso há diversas tecnologias disponíveis que são conhecidas como pilares da indústria. As tecnologias foram agrupadas em quatro clusters tecnológicos: *Cyber-physical systems*, *IoT*, *On-demand availability of computer system resources*, *Cognitive computing*. O Quadro 1 resume todos os clusters mencionados e as tecnologias relacionadas.

Quadro 1 - Tecnologias da I4.0

Cluster	Tecnologia	Autores
Cyber-physical systems	<i>Machine-to-Machine</i>	Rozo, Florelva, 2020.
	<i>Autonomous robot</i>	Fahimi, 2009.
	<i>Collaborative robot</i>	Rozo e Leonel <i>et al.</i> 2016.
	<i>3D printing or additive manufacturing</i>	Wimpenny, David Ian <i>et al.</i> , 2017.
	<i>Simulation</i>	Schluse, Michael <i>et al.</i> , 2018.
	<i>Augmented Reality</i>	Schmalstieg, Dieter <i>et al.</i> , 2002.
	<i>Virtual reality</i>	Burdea, Grigore; Coiffet, Philippe, 2003.
	<i>Digital Twin</i>	Madni <i>et al.</i> , 2019.
	<i>Horizontal / vertical integration</i>	Liu, Qiong <i>et al.</i> , 2015.
Internet of Things (IoT)	<i>Radio frequency identification – RFID</i>	Ajami, Sima <i>et al.</i> , 2013.
	<i>QR code</i>	Tiwari e Sumit, 2016.
	<i>Barcodes</i>	Jalaly e Robertson, 2005.
	<i>Sensors</i>	Giallorenzzi e Thomas <i>et al.</i> , 1982.
On-demand availability of computer system resources	<i>Big Data</i>	Storey <i>et al.</i> , 2017.
	<i>Big Data Analytics / Data mining</i>	West e Darrell, 2012.
	<i>Cloud or cloud computing</i>	Xu e Xun, 2012.
Cognitive computing	<i>Artificial intelligence</i>	Park <i>et al.</i> , 2018.
	<i>Machine learning</i>	Zhang e Xian-Da, 2020.

Fonte: As autoras

Na I4.0 os processos industriais integram o mundo real e virtual. Máquinas, produtos e componentes compartilham e processam informações de forma inteligente, via sistemas conectados. Este novo modelo de inteligência de produção permite a criação de conexões inteligentes "coisas e máquinas" e a gestão independente dos processos, denominado sistema ciberfísico, que buscam conexões entre elementos computacionais e elementos físicos (YUAN, 2020). É essa integração ciberfísica que representa um aspecto chave do processo de manufatura e produção na I4.0. O progresso tecnológico transformou o paradigma de um modelo de controle centralizado para uma produção descentralizada e autônoma.

Segundo Valdez e Lasi (2015) *cyber-physical systems* refere-se à Internet e tecnologia orientada para o futuro, uma nova geração de sistemas inteligentes com a capacidade de integração e intercâmbio de dados, que são capazes de aprimorar as interações homem-máquina permitindo identidade e comunicação no fluxo de valor da organização por meio da TI. São um elemento essencial para desenvolvimentos tecnológicos futuros, trazendo oportunidades e

desafios de investigação que incluem a concepção e desenvolvimento de equipamentos, como equipamentos de carga e de transporte totalmente autônomos.

Segundo Rodrigues e Kalil (2013) a *IoT* é a base da comunicação entre o mundo real e o virtual. A partir dessa tecnologia, o mundo físico é capaz de se tornar um sistema de informações que utilizam sensores conectados em objetos de qualquer natureza, que se comunica entre si via protocolos de internet próprios. Os produtos que utilizam a internet das coisas são capazes de memorizar o processo produtivo, podendo identificar em que etapa da produção houve falhas, ou a fim de maximizar a eficiência no uso de energia ou materiais.

Estudos conduzidos pelo McKinsey Global Institute (2020) revelam que a utilização da *IoT* no processo produtivo mostra um alto potencial para gerar lucro para a organização. Uma boa parte desse valor será gerado pela otimização do processo de produção. Os pesquisadores destacam que o uso de *IoT* colabora na redução dos custos de manutenção, gestão dos estoques e ajustes automáticos no fluxo de produção, tornando esses processos mais eficientes não apenas na linha de produção, mas também nas cadeias de suprimentos (ALCACER E CRUZ, 2019; SUNG, 2018; BAENA *et al.*, 2017).

*On-demand availability of computer system resources* é a disponibilidade sob demanda de recursos de sistema de computadorizados, que utilizam especialmente o armazenamento de dados (armazenamento em nuvem), sem gerenciamento ativo direto pelo usuário. A tecnologia mais conhecida e utilizada dentro desse cluster é o *Big Data*, sistema capaz de processar um grande volume de dados com velocidade e precisão, ou seja, um aplicativo de computação em nuvem capaz de fornecer uma infraestrutura de computação instantânea, provisionada e gerenciada pela Internet e é citado como um facilitador essencial do CPS (GHOBAKHLOO, 2018).

Gobbo e Lee (2018) acreditam que para garantir uma manufatura inteligente completa, o processo precisa ser capaz de tomar decisões descentralizadas, ou seja, adotando ferramentas de inteligência artificial, como aprendizado de máquina. Essa tecnologia usa a construção de modelos computacionais para analisar e descobrir padrões em grandes conjuntos de dados adequados para o cluster *Cognitive computing* que se refere a plataformas de tecnologia geralmente baseadas em inteligência artificial e pesquisa de processamento de sinais. Essas plataformas abrangem aprendizado de máquina, raciocínio, processamento de linguagem natural, reconhecimento de fala e visão (reconhecimento de objetos), interação homem-máquina, geração de diálogo e narrativa, entre outras tecnologias.

### 2.3 Princípios da I4.0

Corroborando com Hermann *et al* (2016) os princípios da indústria 4.0 fornecem uma sistematização do conhecimento e apoiam as empresas no desenvolvimento de soluções adequadas por meio da identificação de possíveis soluções. Como forma de acompanhar a nova fase de digitalização do setor da mineração, foram mapeados dezesseis (16) princípios da I4.0 conforme o Quadro 2 de acordo com a literatura de pesquisa.

Quadro 2 - Princípios da I4.0

(Continua)

Princípios	Conceito	Autores
<i>Real-time response</i>	A resposta em tempo real é a capacidade de definir ações e modificar os processos de produção de forma momentânea. Uma forma de obter dados mais precisos é utilizando ferramentas da inteligência artificial para auxiliar nas tomadas de decisões analisando todos os dados padrões.	Alcácer e Cruz-Machado, 2019; Dalenogare <i>et al.</i> , 2018
<i>Virtualization</i>	A virtualização é capaz de criar uma cópia virtual do mundo físico, fornecendo informações e realizando análises de dados indispensáveis para a tomada de decisões.	Frank <i>et al.</i> , 2019; Ghobakhloo, 2018
<i>Transparency of information</i>	Transparência nos dados.	Flatt, Holger <i>et al.</i> , 2016. p. 1-4.
<i>Technical assistance</i>	Assistência técnica na Indústria 4.0 muda o papel dos humanos de um operador de máquinas para um solucionador de problemas e tomador de decisões. Os sistemas de assistência são projetados para apoiar os operadores que precisam tomar decisões informadas para resolver problemas urgentes em curto prazo.	Bonner, Mike, 2018
<i>Decentralization</i>	A descentralização tem o propósito de melhorar a produção na indústria, através de sistemas cyber-físicos que ajudam na tomada de decisões com base em análise de dados, tornando a decisão mais segura e independente, garantindo a transparência das informações dentro e fora do processo produtivo. No caso de alguma exceção, interferência ou objetivos conflitantes, as tarefas são delegadas para um nível superior.	Hermann <i>et al.</i> , 2016 / Sung, 2018
<i>Modularity</i>	A modularização é um sistema que se divide em módulos distintos, de modo que a máquina produza de acordo com a demanda. É um dos princípios da I4.0, responsável em desenvolver subunidades de trabalhos que funcionam de forma a reduzir a complexidade do problema, e que podem reconfigurar dinamicamente as rotas de produção.	Hermann <i>et al.</i> , 2016
<i>Heterogeneity</i>	A heterogeneidade é responsável pela diversidade existente dentro de um sistema e a adaptabilidade é o princípio que mostra a capacidade de um sistema de mudar seu estado e ajustar a sua configuração.	Mittal <i>et al.</i> , 2019

## Conclusão

Princípios	Conceito	Autores
<i>Adaptability</i>	A adaptabilidade está diretamente ligada a redução de tempo entre a ocorrência do evento até o efeito da ação tomada é o resultado do aumento da capacidade de adaptação, obtida através da aplicação de tecnologias cujos benefícios impactam diretamente nas etapas de tratativa de eventos.	Leong, Wei Dong <i>et al.</i> , 2020.
<i>Interoperability</i>	Interoperabilidade é a conexão de todos os sistemas através do IoT, é também a capacidade de se comunicar e trabalhar junto com objetos inteligentes	Ghobakhloo, 2018
<i>Personalization</i>	O conceito de personalização da I4.0 traz a produção em massa de bens e serviços de modo que atendam às necessidades específicas de cada cliente.	Mittal <i>et al.</i> , 2019
<i>Sustainability</i>	A sustentabilidade é um dos princípios da I4.0, que garante a capacidade dos processos sem comprometer os recursos do sistema, usando de maneira sustentável causando danos ambientais mínimos.	Qin <i>et al.</i> , 2016
<i>Security</i>	A segurança é a adoção de medidas para controlar o acesso aos recursos do sistema e proteger as informações contra divulgação não autorizada, garantindo assim a integridade do sistema.	Qin <i>et al.</i> , 2016
<i>Reliability</i>	A capacidade de o sistema manter sua produção sem alteração nas suas funções garantindo um bom desempenho e resultado mesmo em caso de mudanças é chamada de confiabilidade.	Qin <i>et al.</i> , 2016 Mittal <i>et al.</i> , 2019
<i>Predictability</i>	A previsibilidade é responsável por mostrar quantitativamente ou qualitativamente o grau de previsão do sistema, que deve ser o mais próximo possível do real.	Sang, Aimin; LI, San-qi., 2002.
<i>Service orientation</i>	A orientação de serviço é a capacidade e o desejo de antecipar, reconhecer e atender às necessidades dos sistemas, às vezes mesmo antes dessas necessidades serem articuladas.	Qin <i>et al.</i> , 2016
<i>Traceability</i>	Os sistemas de rastreabilidade permitem um conceito totalmente novo: visibilidade total de toda a cadeia de suprimentos ao longo do ciclo de vida do produto. Isso significa que você pode rastrear e otimizar com qualidade.	Fernandez, Tiago M. <i>et al.</i> , 2019.

Fonte: As autoras

## 2.4 Dimensão da I4.0

A I4.0 está fortemente focada na melhoria contínua em termos de eficiência, segurança, produtividade das operações e, especialmente, no retorno do investimento. São várias as tecnologias e tendências facilitadoras disponíveis. Ao aplicar os princípios e tecnologias descritos anteriormente, a mineradora poderá operar usando um sistema de produção altamente eficiente e inteligente, atingindo alguma das quatro dimensões do I4.0: *smart manufacturing*, *smart products and services*, *smart supply chain*, *smart work* (HERMANN *et al.*, 2016).

Na *smart manufacturing*, as máquinas são autônomas e se comunicam entre os setores da linha de produção – por meio da automação, robótica avançada e Internet das Coisas (*IoT*).

É um conjunto de tecnologias com foco nos aspectos internos da organização, organizado de forma a tornar o processo mais inteligente (HERMANN *et al.*, 2016).

A autonomia do sistema de produção é a utilização colaborativo homem-máquina, bem como aplicações de ferramentas de manufatura aditiva que garantem a flexibilidade, personalização e sustentabilidade dos ambientes produtivos (SUNG, 2018; RIBEIRO *et al.*, 2018; SANTOS *et al.*, 2018; HENNING *et al.*, 2013).

O trabalho inteligente se resume a satisfação profissional e na qualidade de vida. Com ele, aprendemos a gerir o trabalho de maneira inteligente, utilizando um ótimo planejamento e as tecnologias para minimizar os desgastes físicos e mentais. Essa dimensão é separada em três fases: planejamento, execução e manutenção (RAUCH *et al.*, 2019).

A eficiência operacional de uma empresa está ligada diretamente à sua capacidade de suprir demandas internas com rapidez e qualidade. A cadeia de suprimentos inteligentes é uma metodologia voltada para a antecipação de demandas e precisão sobre as necessidades que impactam a eficiência da empresa visando o trabalho integrado em tempo real das operações de logística da empresa de forma a otimizar os prazos de entrega e outros fatores que afetam os custos de logística. Podemos destacar as plataformas de integração vertical e horizontal (GHOBAKHLOO, 2018; RIBEIRO *et al.*, 2018; SANTOS *et al.*, 2018).

A capacidade de comunicação do produto com o meio ambiente caracteriza a dimensão de produtos e serviços inteligentes, permitindo que eles ofereçam serviços extras ao cliente e colem informações para a fabricação e engenharia da empresa (JABBOUR *et al.*, 2018; GHOBAKHLOO, 2018; GOBBO *et al.*, 2018). São ações essenciais voltadas ao desenvolvimento de conectividade e digitalização de equipamentos, tecnologias como IoT e a análise de dados podem ajudar a contribuir com a otimização dos processos (RIBEIRO *et al.*, 2018; SANTOS *et al.* 2018).

## **2.5 Barreiras da I4.0**

Segundo Horváth e Szabó (2019) a implementação da indústria 4.0 apresenta desafios significativos para as empresas, do ponto de vista tecnológico, organizacional e gerencial. Além disso, os aspectos econômicos, ecológicos e sociais também são muito importantes, pois essas questões dificultam a implementação da I4.0 (MULLER, 2019). O Quadro 3 apresenta as barreiras encontradas na literatura.

Quadro 3 - Barreiras para implantação da I4.0

Continua

Cluster	Características	Descrição	Autores
Gerencial	Cultura Organizacional	Falta de uma cultura corporativa para os conceitos da I4.0	Hamzeh <i>et. al</i> (2018)/Libório de Oliveira (2018)/Dalenogare <i>et al.</i> (2018)/Sousa Jabbour <i>et. al.</i> (2018)/;
	Liderança e gestão	Vontade dos líderes	Schumacher (2016)
		Gestão da Mudança ineficaz	Raj <i>et. al</i> (2019)/Luthra <i>et. al</i> (2018)/Sousa Jabbour <i>et. al.</i> (2018);
		Competências e métodos de gestão	Schumacher (2016)
		Inexistência de coordenação central para I40	Schumacher (2016)
Tecnologias	Padronização	Baixo nível de maturidade das tecnologias	Raj <i>et. al</i> (2019)
		Falta de cultura digital interno e Formação	Raj <i>et. al</i> (2019) / Luthra <i>et. al</i> (2018)
		Falta de padrão de arquitetura de referência	Kamble <i>et. al.</i> (2018)
			Schumacher (2016)
		Falta de infraestrutura	Raj <i>et. al</i> (2019) / Schumacher (2016) / Luthra <i>et. al</i> (2018) / Libório de Oliveira (2018)
	Desafios para garantir Qualidade de Dados/Má qualidade da gestão de dados existentes	Raj <i>et. al</i> (2019) / Luthra <i>et. al</i> (2018)	
	Problemas de segurança e privacidade	Proteção da propriedade intelectual	Kamble <i>et. al.</i> (2018)/ Mogos <i>et. al</i> (2019) / Schumacher (2016)
		Preocupações sobre a segurança cibernética	Horváth <i>et. al</i> (2019) / Raj <i>et. al</i> (2019) / Sung (2018) / Luthra <i>et. al</i> (2018) / Dalenogare <i>et al.</i> (2018)

Cluster	Características	Descrição	Autores
Barreira imposta pelos trabalhadores	Falta de compreensão sobre os benefícios da indústria 4.0	Falta de sistemas de gestão do conhecimento	Kamble <i>et. al.</i> (2018) / Luthra <i>et. al</i> (2018)
		Pouco conhecimento sobre os conceitos da I4.0	Mogos <i>et. al</i> 2019)
		Resistência à mudança	Horváth <i>et. al</i> (2019)
	Formação e capacitação de funcionários	Falta de conjuntos de habilidades adequadas	Sung (2018) / Raj <i>et. al</i> (2019) / Horváth <i>et. al</i> (2019) / Kamble <i>et. al.</i> (2018);
		Competências TIC dos colaboradores	Schumacher (2016) / Kamble <i>et. al.</i> (2018)
		Falta treinamento e capacitação	Sousa Jabbour <i>et. al.</i> (2018)
		Falta de especialização e trabalhadores qualificados	Glass <i>et. al.</i> (2018) / Dalenogare <i>et al.</i> (2018)
Financeira	Restrição financeira	Alto investimento na indústria 4.0 implementação	Kamble <i>et. al.</i> (2018) / Mogos <i>et. Al.</i> 2019) / Libório de Oliveira (2018) / Dalenogare <i>et al.</i> (2018) / Raj <i>et. al</i> (2019)
		Falta de recursos financeiros	Horváth <i>et. al</i> (2019) / Libório de Oliveira (2018) / Luthra <i>et. al</i> (2018)

Fonte: As autoras

As barreiras gerenciais também são um grande problema a ser tratado na implementação da I4.0. De acordo com Agostini e Filippini (2019), para alcançar a implementação avançada da I4.0, a empresa deve se preparar para a transformação no nível gerencial antes da adoção da tecnologia. Para obter avanços relacionados ao processo de manufatura, a organização e a gestão devem ser aprimoradas. Portanto, além de focar na aplicação da tecnologia I4.0, também deve formular uma série de práticas organizacionais e de gestão, que se tornou a chave para enfrentar a quarta revolução industrial.

Raj *et. al.* (2020) acredita que para os países em desenvolvimento, o aprimoramento dos padrões e regulamentações governamentais pode promover a adoção de tecnologias da Indústria 4.0, enquanto para os países desenvolvidos, a infraestrutura tecnológica é essencial para promover a adoção dessas tecnologias.

As barreiras tecnológicas podem ser divididas em duas características, sendo elas: padronização e problemas de segurança e privacidade. A tecnologia é o principal requisito para empresas que estão iniciando projetos na I4.0. Além disso, em geral é necessário a digitalização para conectar diferentes elementos de uma rede. Devido à falta de conhecimento de possíveis benefícios, a maioria das indústrias são relutantes em adotar tecnologias baseadas na I4.0. Na Indústria 4.0, sistemas em geral são acoplados a um mecanismo de inteligência para comunicar-se livremente. Para ter sucesso nisso, as indústrias precisam seguir os protocolos de compartilhamento. A falta de padrões tecnológicos também é uma barreira mencionada por Horváth e Szabó (2019). Stoltz *et al.* (2017) fez um estudo que mostrou que os novos sistemas apresentam diversas falhas dificultando a implementação dos mesmos dentro das organizações já que são necessários vários testes para chegar ao ponto em que o sistema fica viável para uso.

De acordo com Pacchini *et al.* (2020) é notável a preocupação dos gestores em relação com a vulnerabilidade da empresa, diante aos ataques cibernéticos a fábricas em todo o mundo. Logo, a questão da cibersegurança é a barreira que mais dificulta a adoção da *IoT* no setor industrial, pois essa barreira liga todas as outras barreiras críticas encontradas pelos autores. É preciso garantir que os dados captados e transmitidos permaneçam confidenciais, permaneçam intactos e sejam acessados apenas por dispositivos autorizados (SINGH e BHANOT, 2019). Os chamados ataques cibernéticos aos periféricos, onde são mais vulneráveis podem trazer muitos problemas para a empresa, de mineração mesmo que o ataque não ultrapasse todas as camadas e não atinja o coração do sistema.

A falta de infraestrutura é um obstáculo potencial e básico para a adoção da I4.0 (KUMAR *et al.*, 2021). A pesquisa de Mouef *et al.* (2018) aponta que as pequenas e médias empresas possuem equipamentos precários (infraestrutura instável e equipamentos obsoletos) diante de novas possibilidades relacionadas à implantação de tecnologia da I4.0.

Ajmera e Jain (2019) mencionam a falta de padrões para a troca de informações como outra barreira a ser enfrentada. A troca de informações entre as organizações seria extremamente complicada se não houvesse um padrão. Esses autores também mencionam que em um país em desenvolvimento, onde os equipamentos são importados, podem levar a problemas de compatibilidade de software.

Os autores Horváth e Szabó (2019) mostram que o medo existente entre parte dos funcionários de perder o emprego é pelo fato dos mesmos ainda não possuírem habilidades para trabalhar com novas tecnologias. Ademais, a falta de trabalhadores qualificados com as competências necessárias se encaixa também como um grande desafio na quarta revolução. Kamble *et al.* (2019) também acredita que a falta de habilidades humanas é um dos fatores que

precisam de grande atenção por parte dos profissionais que vão realizar a implementação dos novos processos tecnológicos. Com isso, gera outro sentimento de insegurança aos empregadores, o medo de falhar (MAJUMDAR *et al.*, 2021).

Segundo Pacchini *et al.* (2020) a necessidade de utilização dos equipamentos antigos face às novas tecnologias incorporadas nas novas máquinas é uma barreira visto que muitos equipamentos ainda se encontram em perfeito funcionamento, porém não estão preparados para receberem as novas tecnologias, implicando em um investimento que nem todas as organizações estão dispostas a fazer.

Segundo Erol (2016) na Indústria 4.0, as restrições financeiras são consideradas um desafio muito importante entre as organizações para desenvolver suas capacidades em termos de equipamentos e máquinas avançadas, instalações e inovações de processos sustentáveis.

### 3. METODOLOGIA

A presente pesquisa adotou como método de pesquisa o estudo de caso. De acordo com Yin (2010) esse método consiste em uma investigação empírica que estuda um fenômeno contemporâneo em profundidade e em seu contexto de vida real. O autor ainda destaca que o estudo de caso é um método de pesquisa ideal, se envolver a identificação do tipo de "como" e "por que" certos fenômenos ocorrem. De fato, o presente trabalho buscou identificar os obstáculos encontrados pelos projetos de uma mineradora na adoção do I4.0 e entender como e por que eles afetam a implementação das tecnologias.

Por isso, quanto à abordagem, esta pesquisa é caracterizada como qualitativa. Quanto ao tipo de pesquisa, pode ser classificado como pesquisa exploratória, pois forneceu mais esclarecimentos sobre o problema para o estabelecimento de hipóteses. Segundo Gil (2008), a pesquisa envolve: levantamento bibliográfico, entrevista com pessoas com experiência prática nas questões de pesquisa e análises para estimular a compreensão.

Com relação à técnica de coleta de dados, deve-se levar em consideração que o estudo de caso analisado validou as percepções dos gestores sobre as barreiras à I4.0 para adoção das tecnologias nos projetos da mineradora. Para tanto, na pesquisa de campo desenvolvida, a entrevista semiestruturada foi utilizada como método de coleta de dados.

Bryman (2003) acredita que o uso desse tipo de entrevista deve ser a técnica de coleta de dados preferida para pesquisas qualitativas. A autora acredita que o objetivo é permitir que as entrevistas fossem conduzidas de forma mais natural, permitindo aos entrevistados lidar com os assuntos discutidos com mais tranquilidade e minimizar as restrições à sua consideração. Este é quase um diálogo informal entre o entrevistado e o entrevistador. À medida que a entrevista progride naturalmente, questões relacionadas à pesquisa são levantadas.

Portanto, constatou-se que essa é uma técnica conveniente para a realização deste trabalho, uma vez que se espera que os entrevistados possam expressar livremente o que consideram serem os obstáculos para a adoção da I4.0.

Todavia, para que o diálogo possa fluir naturalmente nas entrevistas semiestruturadas, Cauchick Miguel e Sousa (2010) sugerem que o pesquisador elabore um roteiro contendo as questões que pretende levantar na discussão com o entrevistado. Porém, o roteiro serve apenas como um guia para o pesquisador garantir que aspectos relevantes de sua pesquisa sejam abordados, pois ele tem a liberdade de trabalhar com o entrevistado para desenvolver o tema na direção que lhe for mais conveniente.

Assim, estruturou-se um questionário dividido em dois blocos (apêndice A) para ser usado como um roteiro durante as entrevistas. O primeiro bloco aborda a caracterização dos projetos em relação aos seus objetivos, às tecnologias utilizadas, princípios e dimensão que se desejam alcançar. O segundo bloco, foi estruturado após estudar diversos artigos científicos sobre as barreiras vivenciadas pelas equipes durante a adoção das tecnologias da I4.0. As barreiras foram agrupadas em 4 clusters: tecnológica, gerencial, pessoas e financeira. Para cada cluster foram apresentadas as suas características a fim de ajudar a identificar de barreiras enfrentadas pela empresa de mineração na execução de projetos.

Para complementar as informações coletadas na entrevista e buscar um entendimento mais aprofundado, foram utilizadas outras fontes de pesquisa, como o site da empresa, materiais internos fornecidos pelo gestor e reportagens veiculadas na mídia. A análise do conteúdo desta pesquisa é de caráter descritivo e visa analisar as tecnologias, dimensões, princípios e as barreiras enfrentadas para adoção da I4.0 na mineradora.

Para complementar as informações coletadas na entrevista e buscar um entendimento mais aprofundado, foram utilizadas outras fontes de pesquisa, como o site da empresa, materiais internos fornecidos pelo gestor e reportagens veiculadas na mídia. O quadro 04 mostra onde e quais os dados foram coletados.

Quadro 4 – Coleta de dados

Continua

Projeto	Documento
Mina autônoma (caminhão, perfuratriz, trator de esteira)	Entrevista com gerente da mina autônoma, duração de 40 min. Meio utilizado para entrevista: teams.
	Entrevista com gerente da área de inovação, duração de 25 min. Meio utilizado para entrevista: teams.
	Site da empresa: <a href="http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/news/Paginas/vale-iniciara-testes-para-implantacao-da-operacao-autonoma-em-caminhoes-fora-de-estrada-em-carajas.aspx">http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/news/Paginas/vale-iniciara-testes-para-implantacao-da-operacao-autonoma-em-caminhoes-fora-de-estrada-em-carajas.aspx</a> ; <a href="http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/news/Paginas/vale-tera-a-primeira-mina-operando-somente-com-caminhoes-autonomos-no-brasil.aspx">http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/news/Paginas/vale-tera-a-primeira-mina-operando-somente-com-caminhoes-autonomos-no-brasil.aspx</a> ; <a href="http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/news/Documents/noticias/vale-iniciara-testes-para-implantacao-da-operacao-autonoma-em-caminhoes-fora-de-estrada-em-carajas.html">http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/news/Documents/noticias/vale-iniciara-testes-para-implantacao-da-operacao-autonoma-em-caminhoes-fora-de-estrada-em-carajas.html</a> .
	Reportagem vinculada na mídia: <a href="https://im-mining.com/advertiser_profile/schlam-closes-feedback-loop-mining-customers/">https://im-mining.com/advertiser_profile/schlam-closes-feedback-loop-mining-customers/</a> ; <a href="https://www.em.com.br/app/noticia/economia/2021/07/01/internas_economia,1282374/vale-vai-operar-dez-caminhoes-autonomos-em-carajas.shtml">https://www.em.com.br/app/noticia/economia/2021/07/01/internas_economia,1282374/vale-vai-operar-dez-caminhoes-autonomos-em-carajas.shtml</a>

## Conclusão

Projeto	Documentos
Mina autônoma (caminhão, perfuratriz, trator de esteira)	Vídeos disponíveis em plataformas públicas: <a href="https://www.youtube.com/watch?v=LXyBD1W9k6U">https://www.youtube.com/watch?v=LXyBD1W9k6U</a> (duração 2 min 35 s); <a href="https://vimeo.com/109826309">https://vimeo.com/109826309</a> (duração 5 min 15 s) <a href="https://www.youtube.com/watch?v=PhcJvSINt0U">https://www.youtube.com/watch?v=PhcJvSINt0U</a> (duração 1h 51 min)
COI	Entrevista com coordenador do COI, duração de 5 min. Meio utilizado para entrevista: teams.
	Site da empresa: <a href="http://www.vale.com/brasil/pt/aboutvale/news/paginas/vale-implanta-centro-operacoes-integradas-minas-gerais.aspx">http://www.vale.com/brasil/pt/aboutvale/news/paginas/vale-implanta-centro-operacoes-integradas-minas-gerais.aspx</a>

Fonte: As autoras

## **4. CASO PRÁTICO**

Em 2016, a mineradora elaborou um plano de transformação digital que se adapta à I4.0. O plano permite à empresa promover a integração entre as áreas de negócios globais, reduzir custos, simplificar processos, melhorar a produtividade e eficiência operacional e alcançar o melhor índice de saúde e segurança. Esta seção apresentará os quatro projetos da mineradora, três dos quais pertencem à mina autônoma (caminhões fora de estrada, perfuratriz e tratores) e um outro é o projeto do Centro de Operações Integradas (COI). Sequencialmente, tais projetos serão avaliados do ponto de vista da tecnologia, princípios e dimensões da I4.0.

### **4.1 Projetos Mina Autônoma**

A mineradora implantou um projeto piloto Mina Autônoma em Brucutu - São Gonçalo do Rio Abaixo (MG). O primeiro projeto lançado foi à perfuratriz autônoma em 2013. Em 2015, iniciou a operação remota do trator de esteira de grande porte. Posteriormente, em 2016, teve início o projeto de implantação dos caminhões fora de estrada autônomos.

Todos esses equipamentos são conectados à sala de controle, onde são realizadas as operações, e os profissionais enviam controles de escritório e máquinas e realizam seu trabalho em condições adversas. Com isso, o principal objetivo da empresa com a adoção deste projeto é a segurança dos funcionários, pois os leva de locais perigosos para ambientes controlados.

O projeto de Brucutu é um piloto que visa entender como usar a tecnologia autônoma e os seus resultados. A ideia é utilizar veículos autônomos em unidades com maior valor de produção e velocidade de mineração, enquanto os caminhões e motoristas tradicionais mantêm minas de baixo volume.

Os projetos que compõem a mina autônoma são: perfuratriz autônoma, trator de esteira de grande porte e caminhão fora de estrada.

#### **4.1.1 Perfuratriz autônoma**

No processo de exploração mineral, a perfuração de rocha é uma atividade essencial. Para este trabalho, é utilizada máquinas de perfuração, denominadas perfuratrizes. Por meio do processo de perfuração autônomo, a mineração melhora significativamente a precisão e a eficiência do processo de detonação de explosivos, reduzindo a carga de trabalho das máquinas de carregamento e eliminando certos riscos de segurança.

Figura 1 – Representação da perfuratriz autônoma



Fonte: Perfuratriz (2021)

Para a mineradora em estudo, o motivo da adoção dessa tecnologia autônoma está relacionado à segurança, pois retira funcionários de áreas de risco. O quadro 5 mostra a comparação entre o antigo processo de perfuração com máquina convencional e a autônoma do ponto de vista de método de trabalho, segurança, desempenho e custo.

Quadro 5 – Perfuratriz Convencional x Autônoma

Continua

Requisito	Condição anterior: equipamento convencional	Condição atual: equipamento autônomo
Forma de trabalho	A marcação da malha de perfuração é feita manualmente, colocando um papel dobrado no solo sobreposto com uma pedra. Devido ao movimento do papel, esta forma de marcação apresenta muitas imprecisões. O equipamento é operado por uma pessoa da cabine que tem algumas dificuldades, por exemplo, não consegue posicionar com precisão a broca no orifício demarcado. Além de estar exposto a condições adversas.	A marcação da malha de perfuração e operação da perfuratriz é feita em uma sala de controle. Assim, retira os empregados da área de lavra.
Segurança	As pessoas ficavam expostas aos riscos da área de detonação. A segurança pessoal e operacional dependia do comportamento e decisões do ser humano.	Se algo/alguém exceder o limite de alcance, a tecnologia interrompe a plataforma de perfuração, evitando possíveis acidentes. O equipamento mantém os operadores longe de poeira, vibração e outras condições perigosas ao redor da plataforma em execução, e os mantém com segurança longe da área de detonação.

## Conclusão

Requisito	Condição anterior: equipamento convencional	Condição atual: equipamento autônomo
Desempenho	Imprecisão dos furos, acarretando menor confiabilidade. Informações limitadas. Menor produtividade.	Alta precisão, qualidade e eficiência do processo de detonação de explosivos. Alto rendimento operacional, pois há operação diurna e noturna (24h/7d) >HT/dia, sem pausas. Aumento de aproximadamente 10% na produtividade e redução de horas paradas para manutenção em 8%. Menor frota com aumento equivalente da vida útil. Economia de combustível usado nas máquinas que resulta ainda em volume mais baixo de emissões de CO2 e particulados e ainda reduz a geração de resíduos como peças, pneus e lubrificantes, contribuindo para com a sustentabilidade.
Custo	A imprecisão dos furos causa um grande impacto, pois com material detonado de forma desigual se torna mais difícil e mais caro manuseá-lo, resultando em maior custo por tonelada para toda a operação.	Reduz os custos associados com combustível, ferramentas de perfuração, explosivos e manutenção. Redução de custo metro perfurado. Em contrapartida, tem-se o alto custo do investimento.

Fonte: As autoras

Portanto, a partir do quadro 5, observa-se que a tecnologia contribui significativamente para a melhoria da segurança e saúde dos funcionários, produtividade, sustentabilidade e redução de custos.

#### 4.1.2 Trator de Esteira de Grande Porte

No processo de exploração mineral, é necessário preparar o terreno previamente à atividade de extração. Para tanto, utiliza-se o trator de esteira, pois é uma máquina de grande porte, ideal para trabalhar em terrenos acidentados e pode movimentar materiais com confiança, agilidade e precisão.

Figura 2 – Trator de esteira de grande porte



Fonte: Trator de Esteira (2021)

Devido ao terreno desfavorável, os operadores ficam expostos a diversos riscos. Por isso, visando principalmente à segurança e saúde dos empregados, a mineradora aderiu a operação remota (teleoperação) de grandes tratores de esteira. Dessa forma, o operador irá operar o equipamento na sala de controle que simula a cabine da máquina, sendo considerado um veículo semiautônomo porque seu funcionamento depende de pessoas e a máquina não toma decisões. Logo, retirou os empregados de um local de risco, colocando-os em um ambiente controlado.

Figura 3 – Apresentação da cabine remota



Fonte: Cabine remota (2021)

O quadro 6 compara o processo utilizando tratores de esteira convencional e o trator de esteira operado pela cabine remota do ponto de vista do método de trabalho, segurança, desempenho e custo.

Quadro 6 – Trator de esteira convencional x Trator semiautônomo

Continua

Requisito	Condição anterior: equipamento convencional	Condição atual: Teleoperação de tratores de esteira
Forma de trabalho	Os operadores ficam no interior da cabine na área de lavra, expostos a todas as condições de risco da tarefa.	Os operadores ficam em uma sala de controle que simula a cabine do equipamento, operando a máquina a longa distância por meio de controles remoto, o que permite a operação a longas distâncias.
Segurança	A tarefa de operar tratores expõe os profissionais a diversos riscos de saúde e segurança, por exemplo, deslizamento e intensa vibração. Então qualquer falha humana ou mecânica que ocorrer pode colocar em risco a segurança das pessoas e da operação.	Eliminação dos riscos envolvidos na tarefa de operação de tratores, como por exemplo, deslizamento e intensa vibração. Os profissionais agora ficam em um ambiente com riscos mais baixos e controlados.

Conclusão

Requisito	Condição anterior: equipamento convencional	Condição atual: Teleoperação de tratores de esteira
Desempenho	Os tratores possuem bom rendimento.	A produtividade é aumentada, uma vez que não há trocas de turno em função do deslocamento dos funcionários.
Custo	Havia um custo expressivo com manutenção e troca de pneus.	Houve redução nos custos com manutenção do equipamento e pneus.

Fonte: As autoras

Portanto, pode-se observar no quadro 6 que a tecnologia tem contribuído significativamente para a melhoria da segurança, saúde dos funcionários e a produtividade da tarefa.

#### 4.1.3 Caminhão Fora de Estrada

Uma etapa do processo de exploração mineral envolve o transporte de materiais extraídos da jazida por meio de operações de lavra para diferentes pontos de descarga. Para tanto, comumente utilizam-se os caminhões fora de estrada, um equipamento muito robusto capaz de trabalhar com alta pressão de cargas.

A partir de 2018, a mina de Brucutu começou a operar apenas com os caminhões autônomos que fazem todo o trabalho sem necessidade do operador. O objetivo da adoção dessa tecnologia é contribuir com a prevenção de acidentes, aumentando a segurança dos condutores e das operações.

Figura 4 – Caminhão fora de estrada autônomo



Fonte: Caminhão Fora de Estrada (2021)

O quadro 7 mostra como era o processo quando utilizava caminhões tripulados e os caminhões autônomos do ponto de vista do método de trabalho, segurança, desempenho e custo.

Quadro 7 – Caminhão tripulado x Caminhão autônomo

Requisitos	Condição anterior: equipamento tripulado	Condição atual: equipamento autônomo
Forma de trabalho	O caminhão é operado por um profissional capacitado no interior da cabine do equipamento.	O operador fica em uma sala confortável em uma cabine perfeitamente reproduzida com um espaço virtual à sua frente, que simula com precisão a área da mina em que irá trabalhar. Os caminhões autônomos podem fazer todo o trabalho sem a necessidade de um operador. O veículo muda de marcha no momento certo, reduz ou acelera a velocidade.
Segurança	Os operadores são expostos a vários riscos muito altos, como colisão, tombamento e atropelamento, uma vez que passa a sua jornada de trabalho na área de lavra operando o caminhão. Então qualquer falha humana ou mecânica que ocorrer coloca em risco a segurança das pessoas e da operação.	Eliminou a necessidade de homens operarem o equipamento, diminuindo a exposição dos empregados a riscos de acidentes. A tecnologia identifica obstáculos imprevistos e mudanças no caminho determinado pela central de controle. Depois de detectar o risco, o dispositivo interrompe a operação.
Desempenho	A restrição de velocidade do caminhão, devido ao risco de segurança, afeta diretamente a produtividade. Além disso, a produtividade dependia do comportamento humano, da eficiência e eficácia dos operadores. Também ficava condicionada a questões climáticas e as manutenções corretivas que aconteciam com muita frequência, pois não havia modelos preditivos para indicar as falhas dos pneus.	Foi possível aumentar a velocidade e eficiência dos caminhões, que reduz os tempos de ciclo e aumenta a produção em até 25%. Houve aumento da vida útil de equipamentos, pois o fácil acesso aos pontos de manutenção diária simplifica a manutenção e reduz o tempo gasto em procedimentos de manutenção regular. A maior facilidade de manutenção e os longos intervalos entre manutenções têm por objetivo aumentar a disponibilidade e a produtividade da máquina.
Custo	Havia um custo expressivo com pneus e peças para manutenção dos caminhões, acarretando enormes prejuízos para a empresa, afetando também a produtividade, uma vez que o caminhão ficava inoperante.	Redução de custo com pneu e gastos com manutenção, uma vez que as tecnologias em conjunto com modelos preditivos indicam o tempo certo da manutenção. Redução em 10% no consumo de combustível. A economia de combustível usado nas máquinas resulta ainda em volume mais baixo de emissões de CO2 e particulados e ainda reduz a geração de resíduos como peças, pneus e lubrificantes.

Fonte: As autoras

Assim, pode-se observar no quadro 7 que a tecnologia tem contribuído consideravelmente para a melhoria da segurança, saúde dos funcionários, desempenho da tarefa, produtividade e custos.

## 4.2 Projeto COI

Em 2017 deu início às atividades do COI. O COI busca a integração de tudo que a mineradora faz, com a otimização de todos os recursos envolvidos. O objetivo do projeto é sincronizar as diferentes etapas da operação no Brasil e no exterior, envolvendo o planejamento, a programação e o controle, além de almejar aproximar essas etapas da área de vendas.

Para promover essa sincronização, o projeto visa simplificar o processo de tomada de decisão e focar na criação de valor e maximização de resultados, ou seja, priorizar resultados ótimos globais em vez de resultados ótimos locais.

Figura 5 – Sala COI



Fonte: Sala COI (2021)

O quadro 8 mostra como era o processo quando não existia o COI e os resultados obtidos com a criação do COI.

Quadro 8 – Fluxo de informação descentralizado x COI

Continua

Requisito	Fluxo de informação anterior	Fluxo de informação atual: COI
Forma de trabalho	A distância era um fator que tornava a interação entre áreas operacionais e estratégicas um verdadeiro desafio. Cada área tinha foco em seu próprio resultado, buscava o ótimo para sua área. Assim, nem sempre a soma desses ótimos é um ótimo global. Não se tratava apenas de juntar as equipes numa mesma sala, mas sim integrar a forma como faz o trabalho de planejamento, programação e controle da cadeia de valor do minério de ferro.	As equipes da operação têm uma visão completa da cadeia de valor do minério de ferro da Mineradora e um maior poder de reação diante da volatilidade do mercado, em função da integração de cada corredor. Dessa forma, os empregados estão mais próximos do objeto central de decisões, compartilhando problemas, soluções e inovações.

## Conclusão

Requisito	Fluxo de informação anterior	Fluxo de informação atual: COI
Desempenho	Decisões e informações descentralizadas, por vezes havia falta de alinhamento com estratégias globais.	Relação mais estreita entre planejamento e execução; maior estabilidade e previsibilidade na cadeia produtiva; entre a realização de preços e a melhoria da produtividade dos ativos, a receita anual pode ultrapassar U\$600 milhões. Otimização da distribuição de navios e resposta às demandas dos clientes. Todos trabalham com a mesma informação, vista em telões, computadores e dispositivos móveis.
Custo	Alto custo de oportunidade.	Melhor realização de preços de venda e, tendo mais estabilidade e previsibilidade da cadeia produtiva; entre realização de preços e aumento da produtividade dos ativos. A otimização global da operação, o que deverá produzir redução global dos custos operacionais.

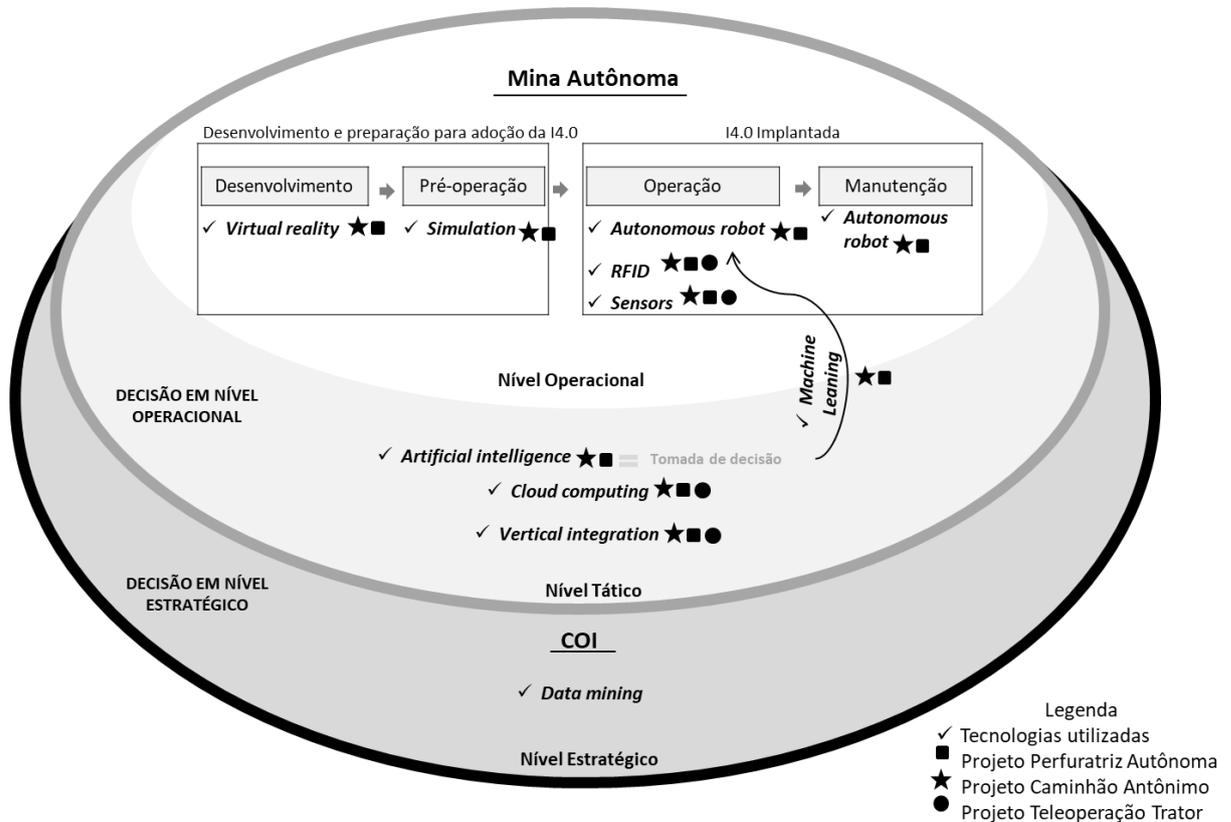
Fonte: As autoras

Assim, pode-se observar no quadro 8 que a tecnologia tem contribuído consideravelmente para a melhoria da gestão da informação, integrando todos os processos da empresa, produzindo resultados confiáveis e melhor negociação e produtividade dos ativos.

#### 4.3 Tecnologia da I4.0

Tendo como referência o quadro 1 que apresenta as tecnologias da indústria 4.0, observou-se que os projetos da empresa em estudo utilizam nove tecnologias, a saber: *virtual reality*, *simulation*, *autonomous robot*, *RFID*, *sensors*, *artificial intelligence*, *cloud computing*, *vertical integration* e *data mining*. A figura 6 sintetiza as fases de elaboração e as tecnologias utilizadas dos projetos da mina autônoma e COI.

Figura 6 – Tecnologias da I4.0 presente nos projetos



Fonte: As autoras

Observe na figura 6 existe uma hierarquia entre as tecnologias, que pode ser dividida em três níveis: operacional, tático e estratégico. O nível operacional inclui tecnologias diretamente relacionadas às operações de mina, que estão na linha de frente das operações e garantem a execução de todas as tarefas. O nível tático engloba as tecnologias que fazem interface com as tecnologias da linha de frente.

Nos níveis operacional e tático o nível de decisão pode ser considerado como nível de decisão operacional, que engloba as decisões e planejamento do dia a dia, de curto e médio prazo. O nível estratégico engloba tecnologia de análise de dados para gerir todas as informações da cadeia de minério e está no nível de decisão e planejamento estratégico, que é a visão do futuro da organização, que se estrutura nos fatores ambientais externos e nos fatores internos. Sendo assim, os projetos da mina autônoma estão no nível de decisão operacional, enquanto o projeto do COI se encontra no nível de decisões estratégicas.

No nível operacional da figura 6, há duas etapas para a implantação dos projetos da I4.0: i) Etapa 1: desenvolvimento e preparação para a implantação da I4.0 e a ii) Etapa 2: projetos da I4.0 implantados. A etapa de preparação para a implantação da I4.0 é subdividida em duas fases:

i) desenvolvimento e a ii) pré-operação, que consiste na adequação e preparação do ambiente operacional e organizacional para adoção das tecnologias.

Na primeira fase da Etapa 1, identificou-se a presença do uso da tecnologia virtual reality, utilizada para virtualizar o ambiente da mina, as pistas e áreas de manobra, utilizadas nos projetos da perfuratriz autônoma e caminhão autônomo. Com isso, é possível desenvolver carros autônomos que operam em ambiente de mineração e realizam as tarefas de transporte e perfuração de forma totalmente autônoma.

A segunda fase consiste na pré-operação da mina para adoção da I4.0. Se trata da capacitação dos empregados que por sua vez utilizam a tecnologia *simulation*, são simuladores 3D para treinar profissionais para operar os equipamentos autônomos perfuratriz e caminhão fora de estrada. Além de facilitar o aprendizado, o simulador também permite que os funcionários se aprimorem com segurança antes de entrar no local.

A Etapa 2, projetos da I4.0 implantados, é subdividida em duas fases: i) operação e a ii) manutenção, que consiste na implementação e manutenção dos ativos. Na fase de operação, os equipamentos autônomos/semi-autônomos já estão em operação. Assim identifica-se a presença das tecnologias *autonomous robot*, *radio frequency identification* - RFID, *sensors*. Os caminhões autônomos e as perfuratrizes autônomas são desenvolvidos como robôs móveis operando em ambientes adversos na área de lavra. Graças ao avanço tecnológico do RFID, a operação assistida de todos dos equipamentos perfuratriz, trator de esteira e caminhão fora de estrada é realizada por meio de dispositivos de radiocomunicação, sensoramento, controle e georreferenciamento.

As três máquinas são equipadas com sensores que permitem ao dispositivo perceber o ambiente e reagir às perturbações ao longo do caminho. O sistema de sensor captura informações em tempo real de objetos com comportamento dinâmico ou estático, assimila as condições da superfície da estrada, como elevações ou desníveis, e reconhece quaisquer mudanças na cena que exigem ou não precisam de resposta. Para a manutenção dos caminhões de estrada, na segunda fase da Etapa 2, também se utiliza a tecnologia *autonomous robot*. Os robôs autônomos são usados na montagem, manutenção e limpeza de equipamentos de mineração.

Avançando para o nível tático da figura 6, há outras tecnologias aplicadas, tais como *artificial intelligence* (IA), *cloud computing*, *vertical integration* e *machine learning*, esta última transita entre os níveis operacionais e táticos. Milhões de dados são coletados e analisados com a ajuda de sistemas da IA nos projetos de equipamento autônomos. Dessa forma, podem ser gerados insights que ajudam a prever problemas e influenciar decisões. O

processamento de dados e imagens da câmera e do radar do veículo orienta de forma independente e segura a navegação do veículo pelo I.A.

O *machine learning* está sendo implantado como a percepção e compreensão do mundo ao redor dos veículos, assim ele retorna decisões para os equipamentos autônomos. Isso envolve principalmente o uso de sistemas baseados em câmeras para detectar e classificar objetos, mas também há desenvolvimentos em LiDAR e radar.

A operação dos equipamentos autônomos/semiautônomos só é possível devido aos avanços tecnológicos da *cloud computing* que permite aos usuários acessar uma grande quantidade de aplicações e serviços em qualquer lugar independentemente da plataforma.

Como processo e operação, o projeto de mina autônoma requer uma gestão integrada para funcionar, para a qual é adotada a tecnologia *vertical integration*. A mineradora possui um centro integrado de todas as etapas do processo produtivo da área de lavra com intuito de monitorar e analisar as condições de infraestrutura, sistemas de controle, equipamentos de mina, controle de processo e indicadores de produção. Essa gestão auxilia no direcionamento das ações das equipes de manutenção e operação, buscando ações decisivas, resultados, produtividade e segurança. Portanto, com o apoio de infraestrutura e ferramentas técnicas, por meio da soma de conhecimentos, há um poderoso método de colaboração, que ajuda a identificar e orientar as ações, facilita a análise e simplifica a tomada de decisões.

A mina autônoma possui essas tecnologias apresentadas e estão no nível de decisão e planejamento local e operacional, envolvendo questões do dia a dia da mina a curto e médio prazo. As decisões e o planejamento estratégico são determinados pelo COI, que inclui a integração de todos os processos da cadeia do minério de ferro em todas as localidades da empresa.

O terceiro nível da figura 6, nível estratégico, engloba tecnologia de análise de dados para gerir todas as informações da cadeia de minério e está no nível de decisão e planejamento estratégico, que é a visão do futuro da organização, que se estrutura nos fatores ambientais externos e nos fatores internos.

Entre as tecnologias da I4.0, estão presentes nesse nível a análise de dados, o data mining. Com essa tecnologia, é possível gerenciar as informações de toda a cadeia produtiva da empresa, desenvolvendo um sistema de previsão para prever os riscos e impactos da cadeia de valor.

Outra tecnologia usada no nível estratégico que também existe no nível operacional é a *Simulation*. Nesse caso, o COI usa a tecnologia para simular decisões ótimas no planejamento estratégico, tático e operacional.

A partir das tecnologias, a área de lavra da mina se torna um sistema de informações que utilizam sensores conectados em objetos de qualquer natureza, que se comunica entre si via protocolos de internet próprios. Assim, os sistemas são capazes de memorizar o processo produtivo, podendo identificar em que etapa da produção houve falhas, ou a fim de maximizar a eficiência no uso de energia ou materiais.

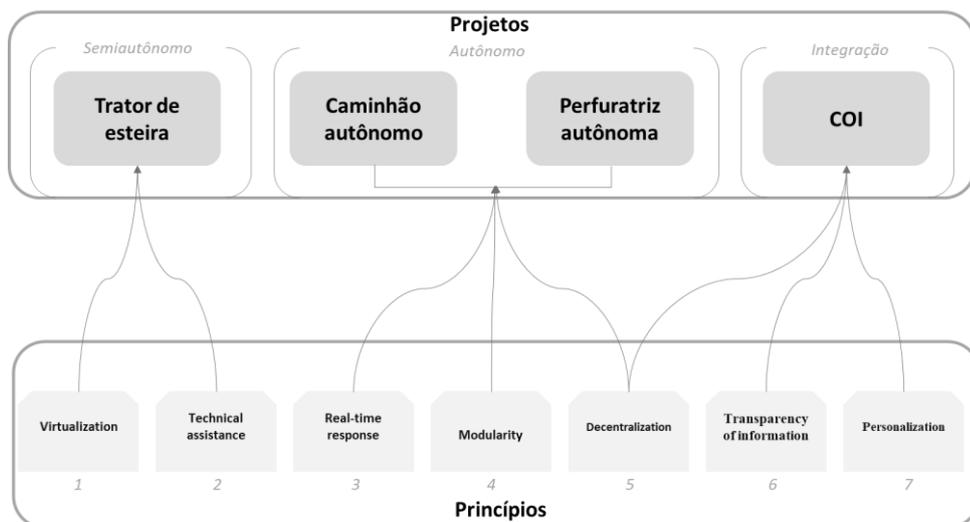
Nota-se que o sistema de mineração autônoma contém as tecnologias mais recentes, inovadoras e automatizadas destinadas a melhorar a produtividade, eficiência e segurança dos locais de trabalho da mina. O COI usa as tecnologias digitais necessárias para facilitar a colaboração entre as equipes, tornar a troca de informações simples e confiável e melhorar a eficácia do planejamento da cadeia de valor.

Portanto, essas tecnologias da I4.0 fornecem muitos benefícios econômicos para a indústria de mineração, reduzem custos, aumentam a eficiência e a produtividade, reduzem o risco de trabalhadores serem expostos a condições perigosas, dão continuidade à produção e aumentam a segurança e contribuem para a sustentabilidade.

#### 4.4 Princípios da I4.0

Na mineração, máquinas inteligentes vão se adequar automaticamente ao processo e tomadas de decisões, diminuindo o desperdício e aumentando a produtividade. A figura 7 mostra os princípios identificados em cada projeto da I4.0 implementado na mineradora.

Figura 7 - Princípios da I4.0 presentes nos projetos



Fonte: As autoras

Os projetos da I4.0 implantados na mineradora foram respaldados pelos princípios evidenciados na Figura 7. A identificação desses princípios foi feita através da análise das tecnologias presentes em cada um deles e das entrevistas com os gestores responsáveis, com isso utilizamos a literatura estudada como interface para definição desses princípios.

O trator de esteira, por se tratar de um equipamento semiautônomo, contempla princípios básicos como a virtualização (1), ele propõe a existência de uma cópia virtual dos caminhos da mina, permitindo o monitoramento remoto, fazendo uso da cabine de controle, de todos os processos por meio dos inúmeros sensores espalhados ao longo da planta.

Os operadores foram treinados e capacitados para trabalhar dentro das cabines remotas de forma mais segura, encaixando o projeto ao princípio da assistência técnica (2), ou seja, muda o papel dos humanos de um operador de máquinas para um solucionador de problemas e tomador de decisões.

Os caminhões e as perfuratrizes são equipamentos 100% autônomos, desta forma os projetos utilizaram três princípios. São eles: Resposta em tempo real (3), modularidade (4) e descentralização (5).

Os equipamentos utilizam a inteligência artificial e tem a capacidade de operar simultaneamente, fazendo a aquisição e tratamento de dados de forma instantânea permitindo a tomada de decisões em tempo real (3). Além disso as Máquinas são capazes de se adequar as variáveis, fazendo as alterações necessárias, facilitando melhorias fundamentais para os processos da mineradora (4).

O princípio da descentralização (5) foi encontrado em três dos quatro projetos estudados, os sistemas presentes na perfuratriz e no caminhão ajudam na tomada de decisões com base em análise de dados, tornando a decisão mais segura e independente. Já o COI utiliza sistemas cyber-físicos que ajudam na tomada de decisões com base em análise de dados, alocando a frota de navios a serviço da empresa de forma sistêmica, sem a influência humana, visando obter o menor custo total de distribuição.

No COI foi possível observar também a presença de mais dois princípios durante a implantação do projeto, a transparência das informações (6) que ocorre por meio da compilação dos dados feita de forma transparente para não beneficiar nenhum setor.

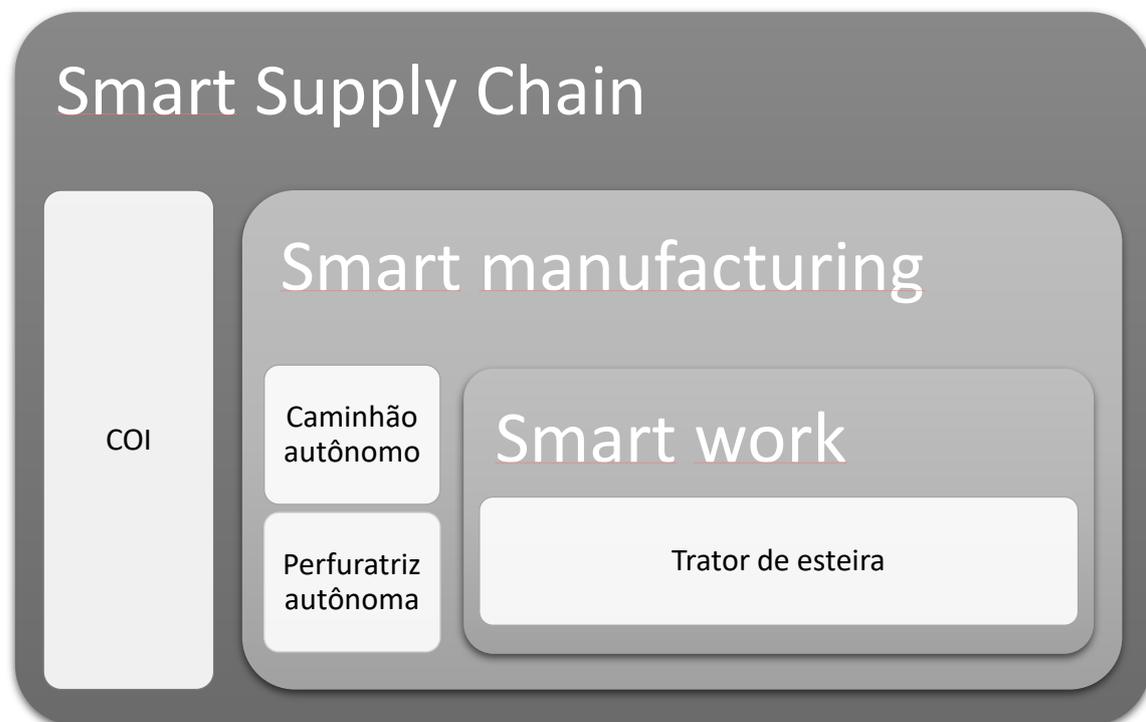
A programação da distribuição e a localização de cada navio é compartilhada por meio dos telões do COI e aplicativos móveis. Um dos pilares para alcançar os objetivos do COI é o uso intensivo de tecnologia digital para promover a colaboração entre as equipes, tornando a troca de informações fácil e confiável, e para melhorar a eficácia do planejamento da cadeia de valor, que é complexa e envolve profissionais distribuídos em diferentes geografias e fusos

horários, de modo que atendam às necessidades específicas de cada cliente, conseqüentemente utilizam o princípio da personalização (7).

#### 4.5 Dimensões da I4.0

Ao aplicar os princípios e tecnologias descritos, a mineradora usando um sistema de produção altamente eficiente e inteligente, atingindo três das quatro dimensões da I4.0: fabricação inteligente, trabalho inteligente e cadeias de suprimentos inteligentes. Essas dimensões são representadas na figura 8.

Figura 8 - Desdobramento das dimensões por projeto



Fonte: As autoras

Existem três dimensões fundamentais a serem desenvolvidas para a evolução da mineradora em direção à Indústria 4.0. O estudo mostra a relação dos princípios e tecnologias com a dimensão presente em cada projeto.

O *smart supply chain* contempla a integração horizontal e está presente no nível de decisão estratégico, é onde se encontra o COI que funciona como uma cadeia de suprimentos inteligentes voltada para a antecipação de demandas e precisão sobre as necessidades que impactam a eficiência da empresa visando o trabalho integrado em tempo real das operações de

logística da empresa de forma a otimizar os prazos de entrega e outros fatores que afetam diretamente esses resultados.

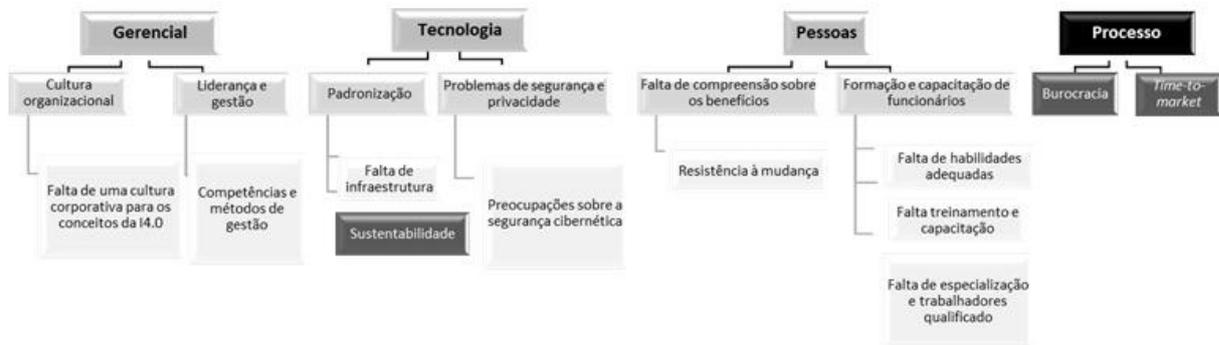
Na dimensão da *smart manufacturing* está presente um conjunto de tecnologias digitais avançadas aplicadas a mineradora que, com integração e conexão em tempo real, permitem ganhos significativos de eficiência e de produtividade. Nessa dimensão estão os projetos envolvendo tecnologias autônomas, ou seja, o caminhão fora de estrada e a perfuratriz que se comunicam entre os demais equipamentos do processo, ou seja, considera o conjunto de tecnologias que se concentram nos aspectos internos da mina.

O *smart working* integra as ferramentas com os trabalhadores por meio de ambientes digitais, desta forma, identificou-se que o projeto do trator de esteira semiautônomo se encaixa nesta dimensão. O projeto visa minimizar a exposição do operador ao risco e ambiente severo da mina, com a utilização do trabalho colaborativo homem-máquina, para garantir a flexibilidade e aumento da segurança nos ambientes operacionais. Além disso, quebra barreiras físicas antes existentes, promovendo a integração entre operadores e fluxos de trabalho, independentemente de localização.

#### **4.6 Barreiras vivenciadas durante a implantação da I4.0**

Para adoção dos projetos da mina autônoma e do COI, a mineradora enfrentou diversos desafios. A análise das entrevistas permitiu identificar e classificar as barreiras à adoção de projetos I4.0. A Figura 9 representa os *clusters* de barreiras identificados na implementação dos projetos à luz da literatura. Nota-se que existem barreiras relacionadas aos *clusters*: gerencial, tecnologias, pessoas e processos. Os retângulos mostrados na cor branca englobam as barreiras presentes nos projetos e na literatura: i) falta de uma cultura corporativa para os conceitos da I4.0, ii) competências e métodos de gestão, iii) falta de infraestrutura, iv) preocupações sobre a segurança cibernética, v) resistência à mudança, vi) falta de habilidades adequadas, vii) falta treinamento e capacitação e viii) falta de especialização e trabalhadores qualificado. Enquanto os retângulos na cor cinza representam as barreiras identificadas nos projetos que não estão presente na literatura: i) sustentabilidade, ii) burocracia e iii) time-to-market.

Figura 9 - Desdobramento das barreiras



Fonte: As autoras

No cluster gerencial, identificou-se a presença de duas barreiras: i) cultura organizacional e ii) liderança e gestão. A barreira cultura organizacional é desdobrada em falta de cultura corporativa com o conceito de I4.0. De acordo com o gerente da TI:

*[...] o primeiro erro que a gente teve na época, foi que a gente lançou uma estratégia de transformação digital com foco na tecnologia e essa estratégia, ela não era entendida pelo negócio. Se você falar, vou transformar o seu negócio por inteligência artificial, ao invés da gente explicar o que seria essa transformação, a gente teve que mostrar o que significa isso. Então os primeiros casos que começaram a dar tração foi quando a gente montou os times multidisciplinares com a engenharia, o pessoal da operação, tecnologia e a gente começou a explorar os dados criado ali, os primeiros modelos e mostrando resultados [...]* (gerente de TI).

Pode-se perceber que a empresa inicialmente encontrou dificuldades em adotar a tecnologia I4.0, pois as pessoas não entendiam como as tecnologias I4.0 poderia ajudá-las no seu dia a dia, por isso carecem da cultura corporativa da I4.

Em relação à barreira liderança e gestão, identificou-se como desdobramento a falta de competências e métodos de gestão. O gerente de TI disse durante entrevista “[...] tem situações na qual o líder não está preparado, como por exemplo, antes se o pneu tivesse murcho ou fora do padrão ele iria falar para seguir com a operação, agora com os autônomos não, se tem qualquer anomalia ele vai parar [...]”. Então essa mudança de *mindset* para liderança é fundamental.

O gerente de TI ainda reforça que “[...] é fundamental a questão da cultura, a gente tem evoluído muito a nossa transformação cultural para conseguir expor mais os problemas,

*quebrar os silos, empoderar as pessoas e, para isso, precisa de muita capacitação, gestão de mudança e apoio da alta liderança [...]”.*

No cluster tecnologia, identificou-se a presença de três barreiras: i) infraestrutura de rede, ii) segurança cibernética e iii) sustentabilidade. A barreira infraestrutura de rede é considerada a mais crítica, pois depende de fatores externos diferente das demais, como grande parte dos sites se encontram em locais remotos para solucionar o problema seria necessário a privatização da rede que depende de liberação do governo, se tornando uma barreira crítica para empresa.

O gerente da mina autônoma diz “[...] *para poder ter uma boa operação não podemos esquecer do sistema de rede da equipe da automação que fica responsável pela manutenção da rede, do sistema, das torres [...]”.* Ele ainda complementa que “[...] *a falta de infraestrutura é um ponto muito importante, por quê?! Se a gente não tem uma boa infraestrutura de rede, uma boa infraestrutura de sala de controle bem definido no projeto, isso coloca em risco sim né?! A operação, tá! [...]”.*

O gerente da mina autônoma também relata que:

*[...] a gente tem alguns fenômenos externos que nós tamo estudando que se chama cintilação ionosférica, que no ano passado a gente perdeu de 1 a 2% na utilização dos caminhões, porque eles identificaram essa cintilação. Isso é muito novo [...] para todas as operações autônomas tudo que trabalha com georreferenciamento ne, através de satélite tem um ponto de preocupação, então a gente também tá atento em relação a isso [...] (gerente da mina autônoma).*

O gerente da TI reforça que:

*[...] acho que outro ponto importante para gente ter uma atenção é com relação as fundações, porque mesmo quando evolui, a por exemplo, vou implementar uma operação autônoma, se eu não tiver a conectividade, que é a nossa fundação, isso pode ser uma barreira pro Brasil e várias outras regiões remotas, a conectividade ainda é um desafio [...] (gerente de TI).*

A sustentabilidade das tecnologias é outro desafio para empresa que se refere a manutenção das tecnologias, ou seja, medidas mitigatórias manter as tecnologias implementadas. Segundo o gerente da TI:

*[...] outro desafio e problema que eu vejo na questão de adoção é a sustentabilidade, porque o processo de adoção depende muito da gestão de mudança efetiva, mas quando entra em operação uma nova solução, como que isso vai ser mantido, né?! Então a gente tem que ter também esse olhar, muito importante da sustentabilidade da inovação. Porque, por exemplo, uma inspeção que antes era feita por uma pessoa e hoje a gente tira a pessoa do risco e ela é feita por um sensor, de forma digital, quem vai dar, como vai ser feita essa manutenção do sensor para que ele sempre continue funcionando corretamente?! Então a gente tem que ter esse olhar na visão de ponta a ponta, isso conecta também com ciclo de vida da inovação. Esses artigos digitais, eles precisam de melhorias continua. Eles têm a questão da visão de produto né?! É como se a gente comprasse um carro e a gente vai tá usando esse carro. A*

*gente tem que manter esse carro, a melhoria do carro. Mas em algum momento a gente vai ter que tomar a decisão de trocar de carro [...] (gerente de TI).*

Assim, nota-se que as barreiras do *cluster* tecnologia representam um grande risco para a empresa. Se houver qualquer problema de infraestrutura de rede, segurança e manutenção das tecnologias, isso podem causar a paralisação da mina ou redução da capacidade de produção e acarretar prejuízo à empresa.

No cluster pessoas, identificou-se a presença de quatro barreiras: i) resistência a mudança, ii) falta de habilidades adequadas, iii) falta de treinamento e capacitação e iv) falta de especialização e trabalhadores qualificados. O gerente da mina autônoma relatou que “[...] a resistência à mudança a gente encontrou bastante né?! Esse ponto foi muito bem alertado na minha entrada em Brucutu sobre essa resistência a mudança, então o objetivo era identificar essas resistências e tratá-las [...]”.

A outra dificuldade foi à capacitação dos empregados “[...] quando cê tem um time muito grande para treinar para uma mudança tão radical acho que foi um ponto de atenção e a gente ainda tem que desenvolver mais pessoas, treinar mais pessoas [...]” disse o gerente da mina.

Também, o gerente da mina destacou que ainda faltam no mercado engenheiros e técnicos com expertise na área de mineração autônoma, por se tratar de um caso de operação inovador, ainda não há especialização nessa área no mercado, ele diz que “[...] ninguém conhece mina autônoma ainda, no mercado. Então há dificuldade de encontrar mão de obra por esses profissionais prontos [...]”.

Foi identificado durante as entrevistas a duas novas barreiras que não estavam presentes na literatura: i) burocracia e ii) *time-to-market*. A lógica das duas não se inclui em nenhum dos cluster citados pela literatura, desta forma julgou-se necessário a criação de um cluster denominado processos.

O gerente da mina da TI relatou que o processo para contratação de uma nova solução demorava muito tempo, devido ao fluxo interno da empresa, o que torna o processo burocrático e lento.

*[...] a gente já teve situações que problemas super relevantes da operação foram resolvidos em apenas dois dias em competições com hackathon, mas quando a gente foi contratar a startup, a gente levou mais de 5 meses no processo de contratação. Então, o processo tradicional não atendia. Mas é claro, a gente consegue mitigar risco, então a gente criou um novo fluxo [...] que a gente consegue contratar a inovação em poucos dias [...] (gerente da TI).*

Outra barreira para a empresa é a estratégia *time-to-market*, que diz respeito sobre o tempo de lançamento de uma solução até a implementação em escala, tendo em vista que a

mineradora opera em diversos países, então o período de implementação pode ser diferente dado as particularidades de cada local.

*[...] eu vejo que até hoje nossos principais desafio estão no time-to-market que é o tempo que a gente lança uma inovação e a escala. Então, por exemplo, aquela solução que a gente criou lá no norte do Brasil, que gerou resultado na companhia com inteligência artificial. Como que a gente escala isso rapidamente para mais de 52 operações?!*

Nota-se que a empresa enfrentou diversos obstáculos durante a implantação das tecnologias. A empresa alcançou uma transição importante para a inovação ao demonstrar como a tecnologia pode melhorar as operações por meio de estudos de caso internos. Portanto, quando as pessoas com larga experiência de trabalho viram os resultados extraordinários da tecnologia, começou a gerar ímpeto, pois outros departamentos operacionais também precisam de soluções semelhantes.

Nesse processo de aprendizagem, os gestores percebem que, para a implementação de tecnologias da I4.0, a empresa deveria vincular esse processo de implantação à sua estratégia. Os pilares da estratégia da empresa são caracterizados pelos requisitos de segurança, cadeia de suprimentos, gestão e manutenção de ativos, produtividade e sustentabilidade. Desde então, a empresa começou a criar planos específicos para tomar decisões de prioridade de investimento e resultados de negócios de forma mais claras e esperadas. Esses planos são alinhados aos pilares da estratégia da empresa. Eles foram nomeados como plano de Gestão de Mudança.

#### **4.7 Plano de gestão de mudança para gerenciar as barreiras da I4.0**

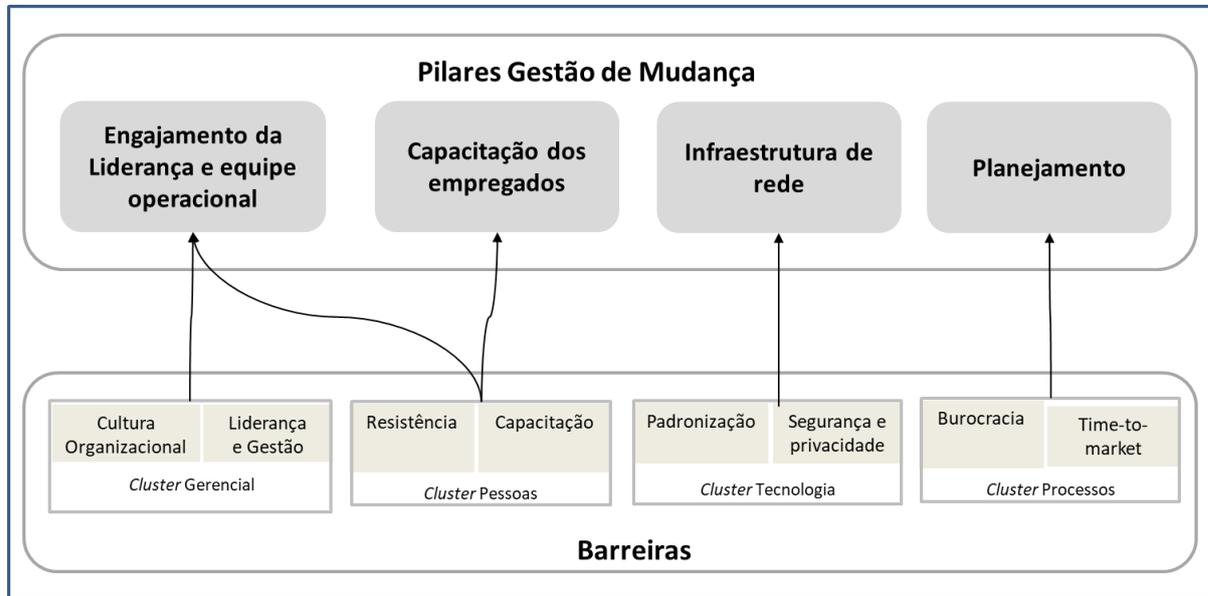
O plano de gestão de mudança é estruturado em quatro pilares: engajamento da liderança e equipe operacional, capacitação dos empregados, infraestrutura de rede e planejamento.

Logo, o plano trata as barreiras que a empresa enfrenta para adoção dos projetos. A mineradora compreendeu que a transformação tecnológica bem-sucedida requer a resolução do problema e, em seguida, uma estratégia bem projetada para implementar. Com isso, a empresa está trabalhando para criar um ambiente que permite mudanças de comportamento. Isso levará a um redesenho de um melhor modelo operacional e incentivará mudanças no comportamento organizacional, desbloqueando assim, o verdadeiro potencial dos funcionários.

Então, o primeiro passo é criar um ambiente que permita mudanças organizacionais e comportamentais para atingir as estratégias de negócio. A figura 10 demonstra a conexão entre

as barreiras presentes na literatura e os quatro pilares do gerenciamento de mudanças da mineradora, representada pelas setas.

Figura 10 – Conexão gestão de mudança e barreiras



Fonte: As autoras

A empresa está passando por uma transformação cultural para tornar o ambiente mais propício à exposição e resolução de problemas. O empoderamento (*empowerment*) das pessoas é um elemento crucial nesse processo de transformação cultural. Essas ações promovem o engajamento da liderança e da equipe de operacional, sendo um dos pilares da gestão de mudança.

Portanto, por meio da participação ativa das lideranças e da equipe operacional, levará a um redesenho de um melhor modelo operacional, além de incorporar e estimular mudanças de comportamento organizacional, liberando assim o verdadeiro potencial dos colaboradores. Ainda para fortalecer a transformação cultural da empresa, a inovação passou a fazer parte da agenda estratégica da alta liderança, como uma alavanca para o futuro da empresa. Dessa forma, o pilar engajamento da liderança e equipe operacional, trabalha as barreiras: cultura organizacional, liderança e gestão e resistência.

Paralelamente, a empresa trabalha no pilar da capacitação dos colaboradores, por meio da construção de formação técnica profissional com treinamentos de inovação ágil, inteligência artificial e democratização da tecnologia. Criando também uma comunidade para compartilhamento de aprendizagens.

Os operadores que ficavam na cabine foram treinados e transferidos para outras funções, sendo uma delas a operação nas salas de controle - com ar-condicionado, sem vibrações e ruídos - distante da frente de mineração, portanto as pessoas continuam a desempenhar um papel importante na operação autônoma, sem exposição aos riscos de saúde e segurança. Com isso, os colaboradores ficam mais envolvidos no processo de mudança tecnológica, sem resistir à mudança, e têm confiança para fazer parte da mudança cultural. Logo, o pilar capacitação dos empregados mitiga as barreiras resistência e falta de capacitação.

O pilar infraestrutura de rede é responsável por garantir o suporte tecnológico para o funcionamento das tecnologias da I4.0. As tecnologias exigem excelente desempenho técnico da rede, caso contrário, colocará em risco as operações. Portanto, este pilar visa melhorar a confiabilidade do sistema e reduzir seu impacto por meio de pesquisas técnicas, monitoramento e contramedidas desse risco. Existem várias medidas para garantir que os ativos sejam monitorados e protegidos, e para garantir a sua segurança.

Uma das medidas, por exemplo, é a criação de infraestrutura redundante. Existem duas salas de controle: uma em funcionamento e outra inoperante, mas preparada para iniciar as atividades a qualquer momento. Caso ocorra qualquer sinistro que paralise as atividades da sala de controle, os profissionais mudarão para outra sala e operará a mina neste local. A troca de sala ocorre em alguns minutos, portanto, a mineradora não terá prejuízos e redução da capacidade produtiva. Dessa forma, o pilar infraestrutura de rede mitiga as barreiras do *cluster* tecnologia.

Por fim, o pilar de planejamento consiste em conectar profissionais e sistemas distribuídos em diferentes geografias e fusos horários, fazendo o planejamento estratégico com antecedência e previsibilidade. Com isso, é possível planejar e readequar quando necessário algum fluxo interno, para tornar o processo mais fluído e não gerar impactos negativos a operação. Esta estratégia também ajuda a priorizar e acelerar a adoção das tecnologias na companhia, diminuindo o *time-to-market*.

Em relação ao exposto, é importante destacar que devido às mudanças culturais estruturais, treinamento, engajamento dos colaboradores e infraestrutura de rede, as barreiras identificadas têm menos impacto negativo nos atuais projetos de adoção de tecnologia da empresa. Tendo em vista que demorou cerca de 2 anos para a mina de Brucutu começar a usar o primeiro caminhão autônomo, enquanto a mina de Carajás demorou 6 meses.

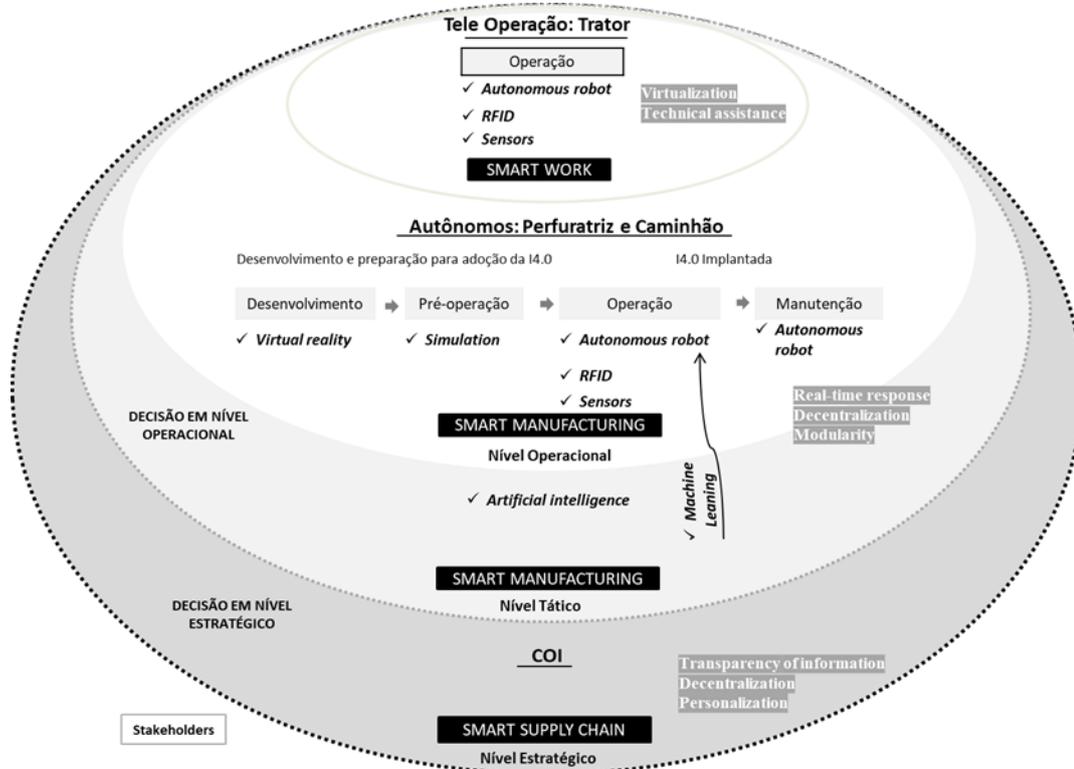
## 5. DISCUSSÃO

Neste tópico está estruturado em dois blocos: framework de integração entre as tecnologias, princípios e dimensões da I4.0 e barreiras da I4.0.

### 5.1 Framework de integração entre as tecnologias, princípios e dimensões da I4.0

A figura 11 apresenta um *framework* de integração entre as tecnologias, os princípios e dimensões existentes em cada nível de decisão da I4.0 com base nos projetos da empresa.

Figura 11 - *Framework* de integração entre tecnologias, princípios e dimensões



Fonte: As autoras

A partir da elaboração do *framework*, figura 11, foram identificadas três contribuições principais desta pesquisa. A primeira contribuição refere-se à hierarquização das tecnologias, dividida em 3 níveis: operacional, tático e estratégico. Os autores do quadro 1 apresentam as tecnologias da I4.0 individualmente, definindo os conceitos de cada uma e as suas aplicações.

Com tudo, conforme a figura 11, é possível propor uma integração das tecnologias dos projetos que permeiam em níveis distintos. Observou-se que as tecnologias dos projetos podem

ser classificadas em diferentes níveis: operacional, tático e estratégico. As tecnologias no nível operacional e tático representam o nível de decisão operacional e são responsáveis pela operacionalização das atividades, substituindo o trabalho humano em áreas de risco com o controle remoto das atividades, os projetos presentes nesse nível corroboram nas tomadas de decisões e planejamento voltados para área operacional. Enquanto o COI utiliza tecnologias em um nível de decisão estratégico.

O segundo achado desta pesquisa é que as tecnologias da I4.0 contribuem em diferentes fases da implantação da I4.0. A partir da análise das informações referente aos projetos dos veículos autônomos, foi possível organizar as tecnologias no nível operacional em 4 fases: desenvolvimento, pré-operação, operação e manutenção. Este panorama de tecnologias usadas nas diferentes fases do processo de adoção do I4.0 não é mencionada na literatura.

A terceira contribuição desta pesquisa consiste no framework de integração entre tecnologias, princípios e dimensões representado pela figura 11. Os autores do quadro 2 também apresentam os princípios da I4.0 separadamente, definindo os conceitos de cada um e as suas aplicações. Os autores Hermann et. al (2016), Sung (2018), Ribeiro et. al (2018), Santos et. al (2018), Henning et. al (2013), Rauch et. al (2019), Ghobakhloo (2018) e Gobbo et. al (2018) abordam sobre as dimensões individualmente. Com tudo, conforme a figura 11, é possível estabelecer um framework de integração entre as tecnologias, princípios e dimensões. As tecnologias, princípios e dimensões dos projetos são separados pelos três níveis da

I4.0. Em cada nível foi possível identificar a relação entre as tecnologias, princípios e dimensões. Logo, as tecnologias, princípios e dimensões contribuem em diferentes fases da implantação da I4.0 desde a preparação até a análise dos resultados.

O nível operacional foi dividido em duas etapas: i) tele operação e ii) autônomos. Para a tele operação foi utilizado tecnologias para viabilizar operação do trator de esteira, assim há o *smart work* que retira o homem da área de lavra, tendo como princípio a *virtualization* e *technical assistance*.

Para adoção dos veículos autônomos, há presença de diversas tecnologias desde o desenvolvimento, preparação e manutenção no nível operacional. As tecnologias da mina autônoma também permeiam o nível tático. Então as tecnologias dos veículos autônomos podem ser associadas a dimensão *smart manufacturing*. Essa dimensão está presente nos dois níveis operacional e tático, pois, os caminhões e perfuratrizes estão na linha de frente da produção e no nível de decisão operacional. A operação é capaz de tomar decisões sozinhas em tempo real. Assim, a presença dos princípios *real-time response*, *descentralization* e *servisse orientation*.

Já o nível estratégico tem a presença da tecnologia para analisar informações que pode ser relacionada a dimensão *smart supply chain*, uma vez que o COI funciona como uma cadeia de suprimentos inteligentes voltada para a antecipação de demandas e precisão sobre as necessidades que impactam a eficiência da empresa visando o trabalho integrado com todas as áreas internas e os stakeholders. Com isso a presença dos princípios *transparency of information, decentralization e personalization*.

O trator de esteira por ser um equipamento semiautônomo não atinge o nível de decisão operacional que retoma os dados à operação, desta forma ele não está no nível tático assim como o caminhão e a perfuratriz. E por esse mesmo motivo a dimensão dos projetos no nível operacional é diferente.

Foi necessário a criação de um centro integrador para todas as etapas do processo produtivo na área de mineração para monitorar e analisar o estado da infraestrutura, sistemas de controle, equipamentos de mineração, controle de processos e indicadores de produção. Essa gestão auxiliou no direcionamento das ações das equipes de manutenção e operação, buscando ações decisivas, resultados, produtividade e segurança. Nota-se que o engajamento da empresa é tão alto que a mesma teve que desenvolver um sistema de gestão que pudesse integrar todas as tecnologias da I4.0 envolvidas no processo.

## 5.2 Barreiras da I4.0

Encontrou-se na literatura 21 barreiras que a indústria pode enfrentar, divididos em 4 clusters: gestão, tecnologia, pessoal e financeiro de acordo com o quadro 3. A partir da análise das entrevistas foi identificado mais um cluster com duas barreiras e a inclusão de mais uma barreira no cluster tecnologia.

A empresa vivencia três barreiras que não estão presentes na literatura, sendo elas: i) sustentabilidade da tecnologia, ii) burocracia e iii) *time-to-market*. No *cluster* tecnologia foi acrescentado a barreira sustentabilidade, pois diz respeito sobrevivência e permanência da tecnologia a curto, médio e longo prazo, ou seja, trata-se de medidas mitigatórias para manutenção efetiva dos projetos.

As barreiras burocracia e *time-to-market* estão relacionadas ao processo da empresa, como a literatura não aborda a lógica dessas duas barreiras foi necessário a criação de um novo *cluster* para inclusão delas, denominado processo. A burocracia diz respeito a dificuldade na contratação de uma nova solução devido ao fluxo interno da empresa, enquanto o *time-to-*

*market* diz sobre o tempo elevado de lançamento de uma solução até a replicação em outros sites.

Os entrevistados não mencionaram nenhuma barreira relacionada ao *cluster* financeiro. Dado que faz parte da estratégia de negócio e a empresa está disposta a investir em tecnologias da I4.0, desde que o projeto traga os retornos esperados, ou seja, ser uma empresa focada na segurança, produtividade e inovação. Para isso, um plano em larga escala com foco em temas estratégicos ajuda a determinar e alocar da melhor forma as prioridades de investimento da empresa.

A empresa está trabalhando para criar um ambiente que permite mudanças de comportamento, para tanto executa o plano de gestão de mudança para gerenciar todas as barreiras vivenciadas. Pode-se notar que uma barreira que requer atenção especial é o *cluster* de tecnologia, pois com ausência de uma boa infraestrutura de rede, segurança e estratégia de sustentabilidade da inovação é impossível sustentar os projetos da I4.0. Em consonância com Kumar *et al.*(2021) a infraestrutura é um obstáculo potencial e básico para a adoção da I4.0.

Vale ressaltar ainda o bom desempenho da infraestrutura de rede está relacionada com a infraestrutura disponibilizada no país, sendo assim a empresa recorre outros meios, como por exemplo, a privatização e parcerias com empresas fornecedoras de rede, no entanto há barreiras governamentais que impedem/dificultam esta ação.

Assim, a barreira infraestrutura de rede é considerada a mais crítica, uma vez que há dependência de fatores externos. Como grande parte dos sites se encontram em locais remotos para solucionar o problema seria necessário a privatização da rede que depende de liberação do governo. As demais barreiras identificadas podem ser tratadas internamente, a empresa pode estabelecer plano de ações para mitigá-las, uma vez que possui controle para gerenciá-las.

## **6. CONCLUSÃO**

O objetivo geral deste trabalho é propor um framework para explicitar o relacionamento entre as tecnologias, princípios e dimensões de alguns projetos da I4.0 no contexto de uma mineradora. Para atender a este objetivo, optou-se por estudo de caso com abordagem qualitativa e análise do conteúdo desta pesquisa é de caráter descritivo.

Com relação ao nível de implementação da indústria 4.0 da mineradora é possível observar que estão avançando de forma significativa replicando os trabalhos nos demais sites, de forma mais ágil com resultados esperados em um tempo significativamente menor.

Foi constatado uma contribuição expressiva da I4.0 na mineradora, principalmente que diz respeito ao uso das tecnologias da I4.0. Os projetos da mineradora estão em consonância com alguns dos princípios e dimensões encontrados na literatura, com isso foi possível identificar em qual dimensão cada projeto se encontra, estabelecendo um alinhamento entre tecnologia, princípio e dimensão.

A infraestrutura de rede é uma barreira potencial à expansão tecnológica na mineradora, pois ela representa uma das premissas para adoção das tecnologias da I4.0. As minas costumam estar localizadas em áreas remotas e a infraestrutura de rede fornecida pelo país geralmente é insuficiente, por isso a empresa adota outros métodos, como privatizações e parcerias com empresas provedoras de rede, mas existem obstáculos governamentais que impedem/dificultam esta ação. Os outros obstáculos identificados podem ser tratados internamente, e a empresa pode desenvolver um plano de ação para mitigá-los, para gerenciá-los.

Diante dos resultados obtidos, pode-se concluir que a transformação tecnológica da empresa não deve ser impulsionada pelas promessas das tecnologias. Independentemente do estágio do processo de transformação da empresa, só é possível ter a inovação como uma alavanca para empresa, quando a tecnologia se torna o habilitador do modelo operacional e não o impulsionador do processo.

Portanto, o primeiro passo é criar um ambiente que permita mudanças organizacionais e comportamentais para atingir as estratégias de negócio. Posteriormente, escolhe-se apenas as tecnologias aplicáveis que sejam consistentes com os objetivos da empresa, independentemente de se concentrarem em melhorar a produtividade ou em outros contribuintes de valor de longo prazo, como saúde e segurança.

Neste sentido, vale salientar que a limitação deste estudo é que as conclusões aqui apresentadas foram obtidas por meio de estudos de caso e não permitem generalização dos resultados obtidos. Como esta pesquisa também está voltada para o setor de mineração, não se pode inferir que as mesmas barreiras existam em outras indústrias. Sendo assim, recomenda-se que pesquisas futuras sejam realizadas com foco na ampliação do estudo aqui realizada para obter conclusões mais amplas e gerais sobre o tema em estudo, bem como uma avaliação das opções estratégicas, de gestão e operacionais para superar adequadamente os obstáculos determinado.

Ademais, outra limitação deste estudo está relacionada ao nível de detalhamento das informações do projeto do COI, pois este é um projeto de nível estratégico e não há informações detalhadas disponíveis. Portanto, não foi possível organizar as etapas de implementação das tecnologias do COI, conforme foi feito para os projetos da mina autônoma.

Pode-se inferir que esta pesquisa contribui para a teoria e a prática. Este estudo discute as questões relacionadas à implantação da I4.0 no Brasil, o que ajudará a fortalecer o arcabouço teórico desse tema em países em desenvolvimento. Sobre a perspectiva prática, os resultados obtidos poderão ajudar os gestores e profissionais da indústria brasileira a compreender as barreiras e dificuldades que enfrentarão na adoção das tecnologias da I4.0, de forma que possam se preparar para superar os obstáculos decorrentes.

## REFERÊNCIAS

- AGOSTINI, Lara; FELIPPINI, Roberto. Organizational and managerial challenges in the path toward Industry 4.0. **European Journal of Innovation Management**, 2019.
- AJAMI, Sima; RAJABZADEH, Ahmad. Radio Frequency Identification (RFID) technology and patient safety. **Journal of research in medical sciences: the official journal of Isfahan University of Medical Sciences**, 2013.
- AJMERA, Puneeta; JAIN, Vineet. Modelling the barriers of Health 4.0—the fourth healthcare industrial revolution in India by TISM. **Operations Management Research**, 2019.
- ALCÁCER, V.; CRUZ-MACHADO, V. Scanning the Industry 4.0: A Literature Review on Technologies for Manufacturing Systems. **Engineering Science and Technology, an International Journal**, 2019.
- ARNESH TELUKDARIE, Mike S. Implementation of Industry 4.0 technologies in the mining industry-a case study. **International Journal of Mining and Mineral Engineering**, p. 50-67, 2020.
- BAENA, , Felipe et al.. Learning Factory: The Path to Industry 4.0. **Procedia Manufacturing**. **Procedia Manufacturing**, 2017.
- BARNEWOLD, Lars; LOTTERMOSER, Bernd G. Identification of digital technologies and digitalisation trends in the mining industry. **International Journal of Mining Science and Technology**, p. 747-757, 2020.
- BRYMAN, Alan. **Research methods and organization studies**.
- BURDEA, Grigore C.; COIFFET, Philippe. Virtual reality technology. **John Wiley & Sons**, 2003.
- CARAMÉS , Tiago M. F. et al. Towards an Autonomous Industry 4.0 Warehouse: A UAV and Blockchain-Based System for Inventory and Traceability Applications in Big Data-Driven Supply Chain Management. **Sensors**, 2019.
- CASANOVA, Mousar. Revolução 4.0: transição ou ruptura? **II Encontro Regional Centro-Sul da ABCiber**, 2019.
- CAUCHICK, Paulo A. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**.
- COELHO, Pedro M. N. **Rumo à indústria 4.0 (Tese de Doutorado)**. [S.l.]. 2016.
- DUARTE, Fábio. **Arquitetura e tecnologias de informação: da revolução industrial à revolução digital**.
- FAHIMI, Farbod. **Autonomous Robots: Modeling, Path Planning, and Control**.

- FERNANDO ROMERO, Ana C. P. A review of the meanings and the implications of the Industry 4.0 concept. **Procedia Manufacturing**, 2017. 1206-1214.
- FLATT, Holger et al. **Analysis of the Cyber-Security of industry 4.0 technologies based on RAMI 4.0 and identification of requirements**. IEEE 21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA).. [S.l.]: [s.n.]. 2016.
- GHOBAKHLOO, Morteza. The future of manufacturing industry: a strategic roadmap toward Industry 4.0. **Journal of Manufacturing Technology Management**, 2018.
- GIALLORENZI, Thomas G. et al. Optical fiber sensor technology. **IEEE transactions on microwave theory and techniques**, 1982.
- GIL, A. C. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**.
- GOBBO, Jose Alcides et al. Making the links among environmental protection, process safety, and industry 4.0. **Process Safety and Environmental Protection, Institution of Chemical Engineers**, 2018.
- GROSVENOR, Roger; QIN, Jian. A categorical framework of manufacturing for industry 4.0 and beyond. **Procedia cirp**, 2016.
- HENNING, Kagermann. **Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0**. [S.l.]. 2013.
- HERMANN, Mario; PENTEK, Tobias; OTTO, Boris. **Design principles for industrie 4.0 scenarios**. 49th Hawaii international conference on system sciences (HICSS). [S.l.]: [s.n.]. 2016.
- HORVÁTH, Dóra; SZABÓ, Roland Zs. Driving forces and barriers of Industry 4.0: Do multinational and small and medium-sized companies have equal opportunities? **Technological Forecasting and Social Change**, 2019.
- INTERNATION Mining. **Internation Mining**, 2021. Disponível em: <[https://im-mining.com/advertiser\\_profile/schlam-closes-feedback-loop-mining-customers/](https://im-mining.com/advertiser_profile/schlam-closes-feedback-loop-mining-customers/)>.
- JABBOUR, Charbel Jose Chiappetta et al. Unlocking the circular economy through new business models based on large-scale data: An integrative framework and research agenda. **Technological Forecasting and Social Change, Elsevier**, 2017.
- JALALY, I; ROBERTSON, I. **Capacitively-tuned split microstrip resonators for RFID barcodes**. European Microwave Conference. [S.l.]: [s.n.]. 2005.
- JIAN QIN, Ying L. R. G. A Categorical Framework of Manufacturing for Industry 4.0 and beyond. **Procedia CIRP**, 2016. 173–178.

- KAMBLE, Sachin; GUNASEKARAN, Angappa; HIMANSHU, ARHA. Understanding the Blockchain technology adoption in supply chains-Indian context. **International Journal of Production Research**, 2019.
- KUMAR, Pramod; BHA, Jaiprakash; SANGWAN, Kuldip S. Analysis of Barriers to Industry 4.0 adoption in Manufacturing Organizations: an ISM Approach. **Procedia CIRP**, 2021.
- LEONG, Wei Dong et al. Enhancing the adaptability: Lean and green strategy towards the Industry Revolution 4.0. **Journal of Cleaner Production**, p. 2020.
- LIU, Qiong et al. **An application of horizontal and vertical integration in cyber-physical production systems**. International Conference on Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery. [S.l.]: [s.n.]. 2015.
- MADNI, Azad ; MADNI, Carla C.; LUCERO, Scott D. Leveraging digital twin technology in model-based systems engineering, 2019.
- MAJUMDAR, Abhijit; GARG, Himanshu; JAIN, Rohan. Managing the barriers of Industry 4.0 adoption and implementation in textile and clothing industry: Interpretive structural model and triple helix framework. **Computers in Industry**, 2021.
- MÉRIDA, Simone M. A.; HASENCÇEVER, Lia; CARVALHO, Marcia M. Reflexos das inovações tecnológicas sobre o emprego: uma revisão da literatura. **Brazilian Journal of Development**, 2019.
- MESQUITA, Pedro P. D.; CARVALHO, Pedro S. L.; OGANDO, Laura D. Desenvolvimento e inovação em mineração e metais. **BNDES Setorial**, 2016.
- MITCHEL, Paul. To achieve sustainable improvements in productivity, mining companies will need to overcome a digital disconnect that has held them back. **EY Global Mining & Metals Leader**, 2019.
- MOEUF, Alexandre. The industrial management of SMEs in the era of Industry 4.0. **International Journal of Production Research**, p. 1118 - 1136, 2018.
- MOILANEN, Jari. Oversoming the Syndrome of Proven Technology. **México Business**, 2018. Disponível em: <<https://mexicobusiness.news/mining/news/oversoming-syndrome-proven-technology?tag=jari-moilanen>>.
- MULLER, Julian; VOIGHT, Kai-Ingo. Sustainable industrial value creation in SMEs: A comparison between industry 4.0 and made in China 2025. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology**, 2018.
- NETO, Euler D. C. **Os impactos da Indústria 4.0 na mineração (Tese de Doutorado)**. [S.l.]. 2019.

- PACCHINI, Athos P. T. Industria 4.0: barreiras para implantação na indústria brasileira. **Exacta**, 2020. 278 - 292.
- PEREIRA, A.C; ROMERO, F. A review of the meanings and the implications of the Industry 4.0 concept. **Procedia Manufacturing**, 2017.
- RAJ, Alok. Barriers to the adoption of industry 4.0 technologies in the manufacturing sector: An inter-country comparative perspective. **International Journal of Production Economics**, p. 107 - 546, 2020.
- RAJI, I.O., S. E. . R. T. A. S. F. "Industry 4.0 technologies as enablers of lean and agile supply chain strategies: an exploratory investigation". **he International Journal of Logistics Management**, 2021.
- RAUCH, Erwin; LINDER, Christian; DALLASEGA, Patrick. Anthropocentric perspective of production before and within Industry 4.0. **Elsevier Ltd**, 2019.
- RIBEIRO, João P. V. **Proposta de adaptação de modelo de maturidade para avaliação de indústrias brasileiras em indústria 4.0**. [S.l.]. 2018.
- ROBERTO FILIPPINI, Lara A. Organizational and managerial challenges in the path toward Industry 4.0. **European Journal of Innovation Management**, 2019.
- RODRIGUES, K. O.; KALIL, F. **Tecnologia e o futuro: internet das coisas, micro**. VII Mostra de iniciação científica e extensão comunitária. [S.l.]: [s.n.]. 2013.
- ROZO, Leonel. Learning physical collaborative robot behaviors from human demonstrations. **IEEE Transactions on Robotics**, 2016. 513-527.
- ROZO-GARCÍA, Florelva. Revisión de las tecnologías presentes en la industria 4.0. **Revista UIS Ingenierías**, p. 177-192, 2020.
- RUBMANN, Michael. Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries. **Boston Consulting Group**, p. 54-89, 2015.
- SAN-QI LI, Aimin S. A predictability analysis of network traffic. **Computer networks**, 2002. 329-345.
- SANTOS, Beatriz P. Indústria 4.0: desafios e oportunidades. **Revista Produção e Desenvolvimento**, p. 111-124, 2018.
- SCHLUSE, Michael. Experimentable digital twins—Streamlining simulation-based systems engineering for industry 4.0. **IEEE**.
- SCHMALSTIEG, Dieter. The studierstube augmented reality project. **Presence: Teleoperators & Virtual Environments**, p. 33-54, 2002.
- SCHWAB, Klaus. **A quarta revolução industrial**.

- SEONG HO PARK, Kyunghwa H. Methodologic guide for evaluating clinical performance and effect of artificial intelligence technology for medical diagnosis and prediction. **Radiology**, 2018. 800-809.
- SINGH, Amartya; BHANOT, Gyan; KHIABANIAN, Hossein. TuBA: tunable biclustering algorithm reveals clinically relevant tumor transcriptional profiles in breast cancer. **Gigascience**, 2019.
- SIRINANDA, K. The new dawn of mining. **Mining Global Magazine**, p. 60-87, 2019.
- SISHI, Mike; TELUKDARIE, Arnesh. Implementation of Industry 4.0 technologies in the mining industry-a case study. **International Journal of Mining and Mineral Engineering**, 2020.
- STOLTZ, Adham Raymond. **An approach to solving a scheduling problem arising in industry**. [S.l.]. 2017.
- STOREY, Veda C. Big data technologies and management: What conceptual modeling can do. **Data & Knowledge Engineering**, p. 50-67, 2017.
- SUNG, Tae Kyung. Industry 4.0 - A Korea perspective. Technological Forecasting and Social Change. **Elsevier**, 2018.
- SUSHI, Mike; TELUKDARIE, Arnesh. **Implementation of Industry 4.0 technologies in the STOREY**. Il-Yeol. Big data technologies and management: What conceptual modeling can do. Data & Knowledge Engineering. [S.l.]: [s.n.]. 2017.
- TIWARI, Sumit. An introduction to QR code technology. **international conference on information technology**, p. 39-44, 2016.
- TURNER, Blair. Latin America. **Rowman & Littlefield**, 2017.
- VALE Brasil. **Vale Brasil**. Disponível em: <<http://www.vale.com/brasil/pt/paginas/default.aspx>>.
- WEST, Darrell M. Big data for education: Data mining, data analytics, and web dashboards. **Governance studies at Brookings**, p. 1-10, 2012.
- WIPENNY, David I. Advances in 3D printing & additive manufacturing technologies. **Springer Singapore**, 2017.
- XU, Xun. From cloud computing to cloud manufacturing. **Robotics and computer-integrated manufacturing**, 2012. 75-86.
- YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**.
- YUAN, Xue-Ming. Impact of Industry 4.0 on Inventory Systems and Optimization, Março 2020.

ZHANG, Xan-Da. Machine learning. In: A Matrix Algebra Approach to Artificial Intelligence. **Springer**, 2020. 223-440.

## APÊNDICE

### Apêndice A - Questionário para mapear os processos de adoção da I4.0

Continua

<b>Questionário para mapear os processos de adoção da I4.0</b>	
O questionário desenvolvido tem como objetivo entender como está sendo a adoção das empresas no contexto da indústria 4.0 a partir de seus projetos.	
<b>BLOCO 1</b>	
Caracterizar os projetos em relação aos seus objetivos, às tecnologias utilizadas, princípios e dimensão que se desejam alcançar.	
<b>Área de implantação do projeto</b>	
<input type="checkbox"/> Manutenção	<input type="checkbox"/> Administração
<input type="checkbox"/> Operação	<input type="checkbox"/> TI
<b>Objetivos do projeto com relação à I4.0:</b>	
<input type="checkbox"/> Reduzir custos operacionais	<input type="checkbox"/> Aumentar flexibilidade da planta
<input type="checkbox"/> Aumentar produtividade	<input type="checkbox"/> Aumentar a capacidade de mudança
<input type="checkbox"/> Aumentar qualidade de processos	<input type="checkbox"/> Aumentar eficiência energética da planta
<input type="checkbox"/> Aumentar a qualidade de trabalho	<input type="checkbox"/> Reduzir o impacto ambiental
<input type="checkbox"/> Reduzir tempos de recebimento e de entrega	
<b>Dimensões da I4.0</b>	
Indique quais das dimensões da I4.0, descritas abaixo, seu projeto está relacionado:	
<input type="checkbox"/> Smart Manufacturing: contempla o conjunto de tecnologias focadas nos aspectos internos da empresa. <input type="checkbox"/> O Smart Working: considera as tecnologias que cumprem a função de auxiliar o trabalhador a se tornar mais produtivo. <input type="checkbox"/> Smart Supply Chain: considera tecnologias de comunicação e integração de informações na cadeia de suprimentos. <input type="checkbox"/> Smart Products and Services: considera produtos que possuem conectividade, permitindo oferecer informações relevantes para a manufatura e engenharia da empresa	
<b>Tecnologias</b>	
Indique quais dos tipos de tecnologias abaixo foram utilizados:	
<input type="checkbox"/> Machine-to-Machine	<input type="checkbox"/> Radio frequency identification - RFID
<input type="checkbox"/> Autonomous robot	<input type="checkbox"/> QR code
<input type="checkbox"/> Collaborative robot	<input type="checkbox"/> Barcodes
<input type="checkbox"/> 3D printing or additive manufacturing	<input type="checkbox"/> Sensors
<input type="checkbox"/> Simulation	<input type="checkbox"/> Big Data
<input type="checkbox"/> Augmented Reality	<input type="checkbox"/> Big Data Analytics / Data mining
<input type="checkbox"/> Virtual reality	<input type="checkbox"/> Cloud or cloud computing
<input type="checkbox"/> Digital Twin	<input type="checkbox"/> Artificial intelligence
<input type="checkbox"/> Horizontal / vertical integration	<input type="checkbox"/> Machine learning

## Conclusão

<b>Princípios</b>	
Indique quais dos princípios da I4.0, descritas abaixo, o projeto está relacionado:	
<input type="checkbox"/> Real-time response	<input type="checkbox"/> Interoperability
<input type="checkbox"/> Virtualization	<input type="checkbox"/> Personalization
<input type="checkbox"/> Transparency of information	<input type="checkbox"/> Sustainability
<input type="checkbox"/> Technical assistance	<input type="checkbox"/> Security
<input type="checkbox"/> Decentralization	<input type="checkbox"/> Reliability
<input type="checkbox"/> Modularity	<input type="checkbox"/> Predictability
<input type="checkbox"/> Heterogeneity	<input type="checkbox"/> Service orientation
<input type="checkbox"/> Adaptability	<input type="checkbox"/> Traceability
<b>BLOCO 2</b>	
Identificar as barreiras enfrentadas pela empresa de mineração na execução do projeto.	
<b>Barreiras tecnológicas</b>	
<b>Padronização</b>	<b>Problemas de segurança e privacidade</b>
<input type="checkbox"/> Baixo nível de maturidade das tecnologias	<input type="checkbox"/> Proteção da propriedade intelectual
<input type="checkbox"/> Falta de cultura digital interno e Formação	<input type="checkbox"/> Preocupações sobre a segurança cibernética
<input type="checkbox"/> Falta de padrão de arquitetura de referência	
<input type="checkbox"/> Falta de infraestrutura	
<input type="checkbox"/> Desafios para garantir Qualidade de Dados	
<b>Barreira gerencial</b>	
<b>Cultura Organizacional</b>	<b>Liderança e gestão</b>
<input type="checkbox"/> Falta de uma cultura corporativa para os conceitos da I4.0	<input type="checkbox"/> Vontade dos líderes
	<input type="checkbox"/> Gestão da Mudança ineficaz
	<input type="checkbox"/> Competências e métodos de gestão
	<input type="checkbox"/> Inexistência de coordenação central para I40
<b>Pessoas</b>	
<b>Falta de compreensão sobre os benefícios da indústria 4.0</b>	<b>Liderança e gestão</b>
<input type="checkbox"/> Falta de sistemas de gestão do conhecimento	<input type="checkbox"/> Falta de conjuntos de habilidades adequadas
<input type="checkbox"/> Pouco conhecimento sobre os conceitos da I4.0	<input type="checkbox"/> Competências TIC dos colaboradores
<input type="checkbox"/> Resistência à mudança	<input type="checkbox"/> Falta treinamento e capacitação
	<input type="checkbox"/> Falta de especialização e trabalhadores qualificados
<b>Barreira Financeira</b>	
<input type="checkbox"/> Alto investimento na indústria 4.0 implementação	<input type="checkbox"/> Falta de recursos financeiros