



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO**  
**ESCOLA DE MINAS**  
**COLEGIADO DO CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E**  
**AUTOMAÇÃO - CECAU**



**SAMUEL ELIAS BORONI REIS**

**TECNOLOGIAS APLICADAS NA INDÚSTRIA 4.0: AVANÇOS NA**  
**INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA, METALÚRGICA E MINERAL**

**MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E**  
**AUTOMAÇÃO**

**Ouro Preto, 2024**

**SAMUEL ELIAS BORONI REIS**

**TECNOLOGIAS APLICADAS NA INDÚSTRIA 4.0: AVANÇOS NA  
INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA, METALÚRGICA E MINERAL**

**Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro de Controle e Automação.**

Orientador: Prof. Adrielle de Carvalho Santana, Dr.Sc.

**Ouro Preto  
Escola de Minas – UFOP  
2024**



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



**FOLHA DE APROVAÇÃO**

**Samuel Elias Boroni Reis**

**Tecnologias Aplicadas na Indústria 4.0: Avanços na Indústria Automobilística, Metalúrgica e Mineral**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Controle e Automação

Aprovada em 21 de fevereiro de 2024

**Membros da banca**

Dra. Adrielle de Carvalho Santana - Orientadora (Universidade Federal de Ouro Preto)  
Dr. José Alberto Naves Cocota Junior - Convidado (Universidade Federal de Ouro Preto)  
Dra. Karla Boaventura Pimenta Palmieri - Convidada (Universidade Federal de Ouro Preto)

Adrielle de Carvalho Santana, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 21/02/2024



Documento assinado eletronicamente por **Adrielle de Carvalho Santana, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 21/02/2024, às 11:28, 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 **0670699** e o código CRC **23A2F7F4**.

**Referência:** Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.001902/2024-36

SEI nº 0670699

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35402-163  
Telefone: 3135591533 - [www.ufop.br](http://www.ufop.br)

*A vitalidade é demonstrada não apenas pela persistência,  
mas pela capacidade de começar de novo.  
(F. Scott Fitzgerald)*

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de estender meus sinceros agradecimentos a todas as pessoas, instituições e empresas que contribuíram significativamente para minha jornada acadêmica e para a conclusão deste trabalho.

À Escola de Minas, pela excelência acadêmica e pelo ambiente propício ao aprendizado que proporcionou ao longo desses anos. Sua tradição e compromisso com a educação foram fundamentais para meu desenvolvimento como estudante e profissional.

À Associação dos Antigos Alunos da Escola de Minas - A<sup>3</sup>EM, por seu apoio contínuo e pela rede de networking valiosa que oferece. O contato com ex-alunos enriqueceu minha experiência e me proporcionou insights valiosos sobre a carreira e o mercado de trabalho.

À Martelada, pelo papel fundamental de atividades extracurriculares, eventos e iniciativas que enriqueceram minha formação acadêmica e pessoal. Obrigado por proporcionar oportunidades de crescimento além das salas de aula.

À minha orientadora, pela orientação sábia, paciência e dedicação ao longo deste processo. Seus insights e conselhos foram cruciais para o desenvolvimento deste trabalho, e sou imensamente grato pela oportunidade de aprender com sua expertise e experiência.

A cada uma das empresas onde estagiei, meu sincero agradecimento pelo acolhimento, pelos ensinamentos e pela oportunidade de vivenciar de perto o mundo corporativo. Os aprendizados e experiências adquiridos durante esses períodos foram de grande valia para minha formação e para a construção da minha trajetória profissional.

Agradeço pelo investimento em minha capacitação e pelo apoio dado ao longo desses estágios. Essas experiências foram essenciais para meu desenvolvimento como profissional e para minha preparação para os desafios que enfrentarei no futuro.

*“Matéria é a parte accidental.” (Oliver Lodge)*

## RESUMO

A Indústria 4.0 está revolucionando diversos setores industriais ao introduzir tecnologias avançadas, como Internet das Coisas (IoT) e análise de dados em tempo real. Essa transformação impulsiona ganhos significativos de eficiência, qualidade e sustentabilidade e proporciona às empresas elevação de excelência operacional e progresso econômico. Portanto, este estudo investiga os avanços das tecnologias da Indústria 4.0 nos setores automobilístico, metalúrgico e mineral, explorando a integração de tecnologias emergentes como Big Data, aprendizado de máquina, instrumentação e robótica. O objetivo é compreender a adaptação e os benefícios dessas inovações para os referidos setores. A análise examina os impactos dessas tecnologias na otimização de processos, na melhoria da eficiência e na criação de novas oportunidades de negócios. Além disso, o estudo reflete sobre os desafios enfrentados pelos setores na implementação e adaptação às mudanças introduzidas pela Indústria 4.0. Este trabalho também apresenta algumas aplicações da Indústria 4.0 nos setores automobilístico, metalúrgico e mineral, e a discussão destaca a importância da rápida adoção dessas tecnologias para manter a competitividade no mercado global. Conclui-se que a compreensão desses avanços é crucial para orientar estratégias futuras e promover o desenvolvimento sustentável dos setores mencionados, alinhando-os com as exigências de uma economia digital em constante evolução.

**Palavras-chaves:** Indústria 4.0, tecnologias emergentes, setor automobilístico, setor metalúrgico, setor mineral, otimização de processos.

## ABSTRACT

The Industry 4.0 is revolutionizing various industrial sectors by introducing advanced technologies such as the Internet of Things (IoT) and real-time data analysis. This transformation drives significant gains in efficiency, quality, and sustainability, providing companies with enhanced operational excellence and economic progress. Therefore, this study investigates the advances of Industry 4.0 technologies in the automotive, metallurgical, and mineral sectors, exploring the integration of emerging technologies such as Big Data, machine learning, instrumentation, and robotics. The aim is to understand the adaptation and benefits of these innovations for the mentioned sectors. The analysis examines the impacts of these technologies on process optimization, efficiency improvement, and the creation of new business opportunities. Additionally, the study reflects on the challenges faced by the sectors in implementing and adapting to the changes introduced by Industry 4.0. This work also presents some applications of Industry 4.0 in the automotive, metallurgical, and mineral sectors, and the discussion highlights the importance of rapid adoption of these technologies to maintain competitiveness in the global market. It is concluded that understanding these advancements is crucial to guide future strategies and promote sustainable development of the mentioned sectors, aligning them with the requirements of a constantly evolving digital economy.

**Key-words:** Industry 4.0, emerging technologies, automotive sector, metallurgical sector, mineral sector, process optimization.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Iron and Coal . . . . .	13
Figura 2 – Cena do filme Tempos Modernos . . . . .	14
Figura 3 – Comparação da precisão entre <i>Deep Learning</i> e <i>Machine Learning</i> . . . . .	20
Figura 4 – Robôs na linha de produção da planta FIAT em Betim. . . . .	28
Figura 5 – Treinamento de Práticas na Mina da empresa Immersive Technologies. . . . .	32
Figura 6 – Linha de produção da Volkswagen em São Bernardo do Campo - SP. . . . .	34
Figura 7 – EspeleoRobo em prospecção de mina. . . . .	36

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AR	Realidade Aumentada
BI	Business Intelligence
CAD	Projeto Assistido por Computador
CAM	Manufatura Assistida por Computador
CAE	Engenharia Assistida por Computador
CLP	Controlador Lógico Programável
DRAM	Memória Dinâmica de Acesso Aleatório
GPU	Unidade de Processamento Gráfico
IA	Inteligência Artificial
IOT	Internet of Things
ICT	Information and Communication Technologies
ML	Machine Learning
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
OPC	Open Platform Communications
OPC-UA	OPC Unified Architecture
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
VR	Realidade Virtual

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> . . . . .	<b>10</b>
1.1	Contextualização . . . . .	10
1.2	Objetivos . . . . .	10
1.2.1	<i>Objetivo geral</i> . . . . .	10
1.2.2	<i>Objetivos específicos</i> . . . . .	10
1.3	Motivação . . . . .	11
1.4	Organização do trabalho . . . . .	11
1.4.1	<i>Introdução</i> . . . . .	11
1.4.2	<i>Revisão da literatura</i> . . . . .	12
1.4.3	<i>Discussão</i> . . . . .	12
1.4.4	<i>Conclusão</i> . . . . .	12
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b> . . . . .	<b>13</b>
2.1	Indústria 4.0 . . . . .	13
2.1.1	<i>Big Data</i> . . . . .	17
2.1.2	<i>Aprendizado de máquina</i> . . . . .	17
2.1.3	<i>Instrumentação</i> . . . . .	21
2.1.4	<i>Robótica</i> . . . . .	22
2.2	Evolução da Indústria 4.0 no Brasil . . . . .	24
2.3	Evolução da indústria automobilística . . . . .	26
2.4	Evolução da indústria metalúrgica . . . . .	29
2.5	Evolução da indústria mineral . . . . .	30
<b>3</b>	<b>AVALIAÇÃO DE APLICAÇÕES DA INDÚSTRIA 4.0 NOS SETORES AUTOMOBILÍSTICO, METALÚRGICO E MINERAL</b> . . . . .	<b>33</b>
3.1	Setor Automotivo . . . . .	33
3.2	Setor Metalúrgico . . . . .	34
3.3	Setor Mineral . . . . .	35
3.4	Discussão . . . . .	36
<b>4</b>	<b>CONCLUSÃO</b> . . . . .	<b>38</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>40</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

Em um conceito mais amplo a tecnologia pode ser definida como o conhecimento ou a teoria da técnica, a forma de se produzir, as noções ou habilidades de se fazer algo, o resultado de pesquisas científicas ou invenções para automatizar e agilizar processos ou serviços. Em grande parte, o sucesso de empresas de tecnologia deve-se ao aperfeiçoamento de algoritmos e procedimentos matemáticos que definem como devem funcionar artefatos digitais do dia a dia, tais como os computadores e os aplicativos, que são essencialmente “máquinas algorítmicas” (GILLESPIE, 2018). A tecnologia não se trata apenas de um avanço, mas pode-se discutir também as reflexões pertinentes e as teorias sobre o assunto. As transformações digitais têm crescido ao longo do tempo trazendo as inovações tecnológicas, e o mundo que se vive atualmente está em torno da chamada revolução 4.0. Além disso, essas transformações trazem pontos muito importantes a se discutir como a velocidade da modernização, incertezas com relação aos próximos passos ou em relação às tecnologias que virão. Conforme o portal da (INDÚSTRIA, 2022):

Indústria 4.0 também chamada de Quarta Revolução Industrial, engloba um amplo sistema de tecnologias avançadas como inteligência artificial, robótica, internet das coisas e computação em nuvem que estão mudando as formas de produção e os modelos de negócios no Brasil e no mundo.

A Indústria 4.0 tem sido uma das principais revoluções tecnológicas dos últimos anos e tem transformado completamente os processos de produção e operações em uma variedade de setores. A adoção de tecnologias inovadoras e modernização nas indústrias metalúrgica, automobilística e mineral é crucial para melhorar a segurança dos trabalhadores, aumentar a produtividade e impulsionar o desempenho econômico das empresas.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo geral

Realizar um estudo sobre a evolução da Indústria 4.0 nos setores automobilístico, metalúrgico e mineral.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Contextualizar a evolução industrial passando pelas Indústrias 1.0, 2.0, 3.0 para chegar na Indústria 4.0;

- Conhecer os pilares da Indústria 4.0 que suportam as tecnologias aplicadas na Indústria 4.0 enfatizando as indústrias automobilística, metalúrgica e mineral;
- Mostrar aplicações da Indústria 4.0 nas indústrias automobilística, metalúrgica e mineral visando ampliar o entendimento da Indústria 4.0 atual.

### **1.3 Motivação**

A introdução de equipamentos automatizados e sistemas de monitoramento avançados reduz os riscos de acidentes e fortalece a imagem da indústria perante a sociedade. Além disso, a implementação de tecnologias como a automação, robótica e inteligência artificial otimiza processos, aumentando a eficiência e reduzindo erros, o que leva a um aumento significativo da produtividade. Essas melhorias resultam em redução de custos de produção, maior margem de lucro e abertura de novas oportunidades de negócio, tornando as empresas mais competitivas e preparadas para enfrentar os desafios do mercado global.

A pesquisa atual examina as aplicações da Indústria 4.0 nesses três setores, com um foco particular motivado pela experiência e interesse pessoal do autor. Tendo realizado estágios superiores no setor automotivo na FIAT, em Betim - MG, no setor metalúrgico na GERDAU em Ouro Branco - MG e no setor mineral na AVANTE em Belo Horizonte - MG, o autor desenvolveu uma compreensão prática das operações e desafios enfrentados por essas indústrias. Essa vivência direta destaca a importância de entender como essas tecnologias são aplicadas nesses setores, visando identificar oportunidades de melhoria, aumento de eficiência e segurança e redução de custos.

### **1.4 Organização do trabalho**

Este trabalho está organizado conforme descrito a seguir:

#### **1.4.1 Introdução**

O processo evolutivo da indústria ao longo do tempo é um fenômeno marcado por mudanças substanciais, impulsionadas por avanços tecnológicos e transformações nas práticas de trabalho. Desde a Revolução Industrial até a atualidade, foi testemunhado uma sucessão de paradigmas industriais, cada um moldando a maneira como as empresas organizam suas operações. A transição para a Indústria 4.0 representa o auge dessa jornada, introduzindo uma era de digitalização, automação e integração de tecnologias inteligentes. Neste contexto, será explorado não apenas a trajetória histórica que levou à Indústria 4.0, mas também como essa revolução impacta principalmente no cenário das indústrias automobilísticas, metalúrgicas e minerais.

#### 1.4.2 Revisão da literatura

A Indústria 4.0, também conhecida como Quarta Revolução Industrial, refere-se à integração de tecnologias inteligentes na produção industrial. Portanto, nesse capítulo engloba-se conceitos de *Big Data*, Aprendizado de máquina, Instrumentação e Robótica além da evolução da Indústria 4.0 e das áreas específicas deste trabalho no cenário brasileiro.

#### 1.4.3 Discussão

Esta seção visa contextualizar casos de aplicação das novas tecnologias nas áreas industriais estudadas, explorando suas implicações positivas e fornecer *insights* valiosos para a compreensão do impacto real da Indústria 4.0 em ambientes industriais específicos.

#### 1.4.4 Conclusão

O capítulo final consolida e instiga pensamentos decorrentes da exploração da Indústria 4.0, seus principais elementos e os casos de implementação apresentados. A conclusão serve como um ponto de partida para reflexões mais amplas sobre o papel transformador da Indústria 4.0 e suas implicações profundas na organização do trabalho e nos paradigmas industriais. A jornada evolutiva continua, e este trabalho busca contribuir de maneira significativa para essa trajetória dinâmica.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 Indústria 4.0

Em 1861 o artista inglês Bel Scott visitou uma fábrica de locomotivas para pintar uma obra sobre aquilo que resultaria do uso de dois elementos que segundo ele eram providências divinas: o ferro e o carvão. Com eles as riquezas aumentam, os confortos se multiplicam e as condições de vida da humanidade melhoram. A obra do artista está ilustrada na Figura 1.



Figura 1 – Iron and Coal.

Fonte: Victorianweb <sup>1</sup>

A obra exaltava a primeira revolução industrial, que tinha começado na Inglaterra 100 anos antes, como resultado da mecanização obtida a partir da energia a vapor e da força da água. Nascia então o que hoje é a chamada indústria 1.0. Outro inglês, o ator e cineasta Charlin Chaplin, eternizou no cinema a imagem de uma linha de produção, típica do início do século XX, em que pessoas realizam tarefas repetitivas, peças passando pela esteira em ritmo frenético, grandes máquinas fazendo parte do processo e um fiscal rígido acompanhando o trabalho braçal dos empregados. A Figura 2 ilustra uma imagem do filme intitulado “Tempos Modernos”.

---

<sup>1</sup><https://victorianweb.org/painting/scott/paintings/6.html>

O modelo de produção de linha de montagem foi implantado por Henry Ford para fabricar o seu carro mais popular, o modelo T. A Figura 2 retrata que a produção em massa em menos tempo significava custos mais baixos e lucros mais altos. Esse era o auge da segunda revolução industrial, ou, como é denominada hoje, a indústria 2.0, que foi impulsionada pela introdução da eletricidade nos processos de fabricação.



Figura 2 – Cena do filme Tempos Modernos.

Fonte: Toda Matéria <sup>2</sup>

Mas não se pode esquecer que as máquinas eram controladas por seres humanos e passíveis de erros. A partir das décadas de 1960 e 1970, com os avanços da informática, das telecomunicações e da robótica, foi desenvolvida a automação industrial, e o aperfeiçoamento do controle dos processos produtivos nas fábricas propiciou a terceira revolução industrial, ou seja, a indústria 3.0.

Atualmente a conexão entre o mundo real e o mundo virtual, chamada de digitalização, é algo corriqueiro, uma vez que utilizando o computador ou *smartphone* é possível checar, por exemplo, saldos bancários e fazer pagamentos de contas, como também pode-se conectar com qualquer pessoa do mundo a qualquer tempo por meio das redes sociais e há o acesso instantâneo a uma infinidade de serviços, como: transportes, entrega de comida e assinaturas de aplicativos de músicas por exemplo. De maneira simplista, pode-se afirmar que a digitalização também chegou à indústria. É uma nova revolução industrial que já se pode observar, pois na revolução da Indústria 4.0, “A incorporação da Robótica, dos Sistemas de Conexão Máquina-Máquina, da Internet das Coisas e dos Sensores e Atuadores utilizados possibilita que máquinas “conversem” ao longo das operações industriais” (INDÚSTRIA, 2022).

---

<sup>2</sup><https://www.todamateria.com.br/tempos-modernos-filme-chaplin/>

A Indústria 4.0 é de fato a industrialização dos processos industriais. O mundo passou pela terceira revolução que foi a automação dos processos reais e, a partir disso, foi possível obter resultados em forma de análise de dados em tempo real ou retrospectiva utilizando algoritmos e inteligência artificial para identificar padrões, prever falhas, otimizar processos, controlar a qualidade e embasar decisões, por meio de sistemas como a realidade aumentada e virtual além de otimizações *online*, em que todo o processo é digitalizado, colhendo as vantagens daquilo que já é automatizado por meio da terceira revolução industrial.

Trata-se de um novo arranjo das empresas e indústrias para fidelizarem os clientes, produzirem e venderem seus produtos. Não é simplesmente uma questão de automação ou digitalização, é uma mudança profunda de como a indústria é organizada bem como os seus processos.

O termo Indústria 4.0 nasce na Alemanha e foi mencionado pela primeira vez pela Chanceler Angela Merkel durante a feira anual de Hanover no ano de 2011. A ideia era já considerar mais avanços na indústria do país, criando fábricas com inteligência artificial, com capacidade de análise de falhas nos processos e autonomia para resolver algumas demandas recorrentes, além de flexibilidade quanto às adaptações e aos requisitos e mudanças não planejados na produção.

O nome Indústria 4.0, parte da hipótese que a sociedade atual está vivenciando a quarta revolução industrial, que vem com a proposta de trazer mais um grande impacto ao modelo de processo produtivo, além disso, o termo 4.0 vem de fato da Alemanha com o objetivo de trazer de volta a manufatura para o território alemão, só que dessa vez com mais eficiência, menos poluição e de forma adequada para o ambiente. Outros países já mencionam a quarta revolução com outros nomes, como nos Estados Unidos, que mencionam a *Internet of Things* (IOT).

A implementação da Indústria 4.0 precisa ter um cunho facilitador e, sobre isso, pode-se destacar a simplificação do conceito. Um exemplo interessante é pegar um dado específico como uma temperatura de 40° graus celsius, (que por si só não representa nada) e correlacionar com outro dado, tal como um corpo humano, gerando uma informação que irá embasar uma tomada de decisão.

Essencialmente a Indústria 4.0 é baseada em dados que resultam em informações relevantes. Esse conjunto de dados e informações relevantes, possibilitam novos modelos de negócios, abrem margem para novos serviços, novas experiências e outros tipos de automação e digitalização dessas fábricas.

Para que uma determinada indústria seja considerada 4.0, os passos a serem seguidos passam pelo chão de fábrica por meio de sensores para extrair dados que geram informação organizada, ou seja, o chamado Big Data.

Sendo assim, a informação é baseada em dados reais que juntos e organizados são capazes de trazer a compreensão de algum comportamento, acontecimento, números, entre outros. Para isso, são incorporados alguns componentes eletrônicos nas máquinas, controladores lógicos e

programáveis (CLP) e sensores, junto com as tecnologias da informação e comunicação (TIC), responsáveis por integrar os processos, máquinas e pessoas (DIEESE, 1994).

Uma série de tecnologias revolucionárias estão impulsionando a Indústria 4.0 e estão mudando a forma como as operações industriais e os processos de produção são executados. A Internet das Coisas (IoT) permite que máquinas e dispositivos se conectem e troquem dados em tempo real, o que aumenta a colaboração e a tomada de decisões inteligentes. O processamento e o armazenamento escaláveis são possíveis com a computação em nuvem, o que torna o compartilhamento e o acesso mais fáceis. A análise de grandes dados e a aplicação de inteligência artificial (IA) fornecem *insights* importantes e tomadas de decisões baseadas em dados. O uso da automação e da robótica sofisticada torna os processos mais eficientes e produtivos.

Esses pilares tecnológicos da Indústria 4.0 estão impulsionando a inovação, aprimorando a competitividade das empresas e abrindo caminho para a criação de fábricas inteligentes e conectadas. A adoção dessas tecnologias cria oportunidades para melhorar a qualidade, a flexibilidade e a personalização dos produtos, impulsionando a transformação e o crescimento contínuos do setor industrial. A seguir algumas dessas tecnologias serão mais detalhadas e discutidas.

São inúmeras as vantagens da experiência que a Indústria 4.0 pode fornecer. A maioria das pessoas se concentram nos aspectos que se referem à produtividade e redução de custos da quarta geração da indústria, mas além desses detalhes é possível focar nas melhorias e nas oportunidades de transformação dos negócios, já que existe um leque muito grande para isso, e que são relacionadas à eficiência na produtividade e redução de custo.

A Indústria 4.0 permite que empresas repensem completamente a respeito de suas relações com os clientes e deixem apenas de vender produtos específicos para passar a vender serviços de alta performance e resultados, aumentam sua margem de lucro a longo prazo, enquanto fascinam seus clientes com produtos e serviços novos. A quarta geração da indústria é muito poderosa e difere da indústria 3.0 porque ela promove essa visibilidade da cadeia. Alguns casos podem ser vistos na atualidade por meio da sensorização de produtos nas fábricas, conforme o portal da (IBM, 2020):

Essas fábricas inteligentes são equipadas com sensores avançados, software integrado e robótica que coletam e analisam dados e permitem tomar melhores decisões. Obtém-se ainda mais valor quando os dados das operações de produção são combinados com dados operacionais de ERP, cadeia de suprimentos, atendimento ao cliente e outros sistemas corporativos para criar níveis totalmente novos de visibilidade e *insight* a partir de informações que antes estavam isoladas.

### 2.1.1 *Big Data*

Quando se trata de conjuntos de dados enormes e complexos, o termo "Big Data" refere-se a uma combinação de três características principais conhecidas como "três Vs": volume (grande quantidade de dados), velocidade (alta taxa de geração e processamento em tempo real) e variedade (diversos tipos e formatos de dados). Para lidar com Big Data, tecnologias sofisticadas de processamento, armazenamento e análise são necessárias para obter *insights* e informações importantes, o que permitirá tomadas de decisões mais inteligentes em vários setores.

Outro ponto a ser analisado é a utilização de fato do Big Data e da massa de dados armazenada para que isso seja colocado em algoritmos inteligentes, com o objetivo de que a tomada de decisão seja assertiva com o auxílio de inteligência artificial. Isso leva as empresas a buscarem novas tecnologias para melhorar seus processos industriais, tornando-os mais ágeis e reduzindo o custo operacional (FULLERTON; KENNEDY; WIDENER, 2014).

As empresas atualmente necessitam da implementação de tecnologia de Big Data, pois se não existir nenhuma forma de organização das informações, elas ficam dependentes das informações humanas, que podem conter falhas e comprometer sua análise.

Conforme (CASSARRO, 2023) precisa-se reconhecer que os sistemas de informações são necessários para todas as organizações e que as informações geradas suportam o ambiente para a tomada de decisão assertiva e com o suporte da inteligência artificial.

O conceito de *Business Intelligence* (BI) surge para reunir os números da empresa dando uma base mais reforçada para análise de problemas e melhorias contínuas, além de ser uma estrutura capaz de reunir um grande volume de informações e entregá-las em um formato analítico e imediatamente reconhecível, e de forma geral, um formato gráfico. Algumas empresas conseguem um desempenho extremamente estratégico com o uso do BI de forma que vem se tornando o seu principal diferencial competitivo.

Para (DAVENPORT, 2014) os procedimentos de Big Data têm como enfoque central encontrar causas ou explicações para determinados eventos, situações ou resultados. E estes resultados podem ser bons ou ruins, ou seja, Big Data deve procurar causas dos problemas e as melhores práticas do sucesso.

### 2.1.2 *Aprendizado de máquina*

Algumas empresas começaram a observar o comportamento do consumidor para tentar se antecipar às necessidades dos clientes, e então começou a serem desenvolvidos algoritmos que analisassem o movimento do público-alvo em portais e aplicativos para recomendar produtos específicos para as pessoas. A estratégia é justamente a antecipação na oferta.

O aprendizado de máquina é um tema muito importante na discussão da Indústria 4.0, pois a ideia é justamente analisar o que está acontecendo, isto é, análise de dados que envolvem compras, acessos, pesquisas, imagens, e ao final aprender do que se trata aquela situação e

tomar uma decisão. “A Indústria 4.0, traz a própria evolução dos sistemas e, claro, revive de forma muito mais gritante esse problema, uma vez que apresenta tecnologias de aprendizado de máquinas para tomada de decisões automáticas, sem a necessidade de intervenção humana” (INDUSTRIAL, 2016).

Redes neurais são um modelo computacional inspirado no funcionamento do cérebro humano, que consiste em uma rede de nós interconectados que processam informações de forma distribuída e paralela. Essas redes são capazes de aprender a partir de exemplos e realizar tarefas complexas, como reconhecimento de padrões, classificação de dados e tomada de decisões.

No contexto das máquinas, as redes neurais são frequentemente utilizadas como uma técnica de aprendizado de máquina para criar sistemas inteligentes que podem ser usados em diversas aplicações, como reconhecimento de fala, visão computacional, processamento de linguagem natural, robótica e análise de dados.

O aprendizado de máquina é uma área da inteligência artificial que desenvolve algoritmos para ensinar sistemas a aprender com dados, sem programação explícita. Esses algoritmos identificam padrões nos dados, permitindo que a máquina faça previsões e tome decisões com base em experiências passadas. O objetivo é melhorar o desempenho e a capacidade do sistema à medida que mais dados são disponibilizados.

O *machine learning* tem a capacidade otimizar processos, baseando-se basicamente em um conjunto de dados e um conjunto de respostas. É possível afirmar que o aprendizado de máquina é o conjunto de técnicas utilizadas para a aquisição de conhecimento pelo sistema (PEREZ, 2017).

Quando o tema são as redes neurais, é importante entender que essas tiveram sua origem a partir do próprio funcionamento do cérebro humano, da comunicação entre os neurônios e a predição modelada por novas representações na camada oculta que leva este resultado a uma predição final. Basicamente são multiplicações e somas e toda vez que algo é visualizado o algoritmo vai se adaptando, aprendendo e aprimorando suas informações.

Nessa linha chega-se a outro conceito importante, o aprendizado profundo, o qual é embasado a partir do aprendizado de máquina, mas como uma análise baseada em um conjunto grande de dados e muitas camadas de processamento a fim de chegar a uma conclusão a respeito de uma informação. De acordo com (CHARU, 2018):

A ideia básica do aprendizado profundo é que a composição repetida de funções muitas vezes pode reduzir os requisitos sobre o número de funções base (unidades computacionais) por um fator que está exponencialmente relacionado ao número de camadas na rede. Portanto, mesmo que o número de camadas na rede aumente, o número de parâmetros necessários para aproximar a mesma função é drasticamente reduzido. Isso aumenta o poder de generalização da rede.

São vários algoritmos analisando os dados e alguns desses algoritmos podem ser especialistas naquele determinado conteúdo, cada um tirando características específicas e conclusões diferentes daquela imagem e no final é necessária uma conclusão. Esse é primeiro passo para que seja possível entender que o trabalho não é isolado. Trata-se de um aglomerado complexo de camadas, que funcionam de forma que cada uma tome decisões baseadas nas camadas anteriores.

As tecnologias que fazem uso de *machine learning* e *deep learning* têm sido usadas ultimamente em diversos processos, serviços e atividades devido ao grande potencial que possuem de fazer análise de dados, alta capacidade de aprendizado, a fim de chegarem a determinadas conclusões de forma eficiente, não sendo algoritmos baseados somente em instruções específicas. Conforme o portal (ORACLE, 2016):

O aprendizado profundo é desenvolvido por camadas de redes neurais, que são algoritmos modelados livremente no modo como os cérebros humanos funcionam. O treinamento com grandes quantidades de dados é o que configura os neurônios na rede neural. O resultado é um modelo de aprendizado profundo que, uma vez treinado, processa novos dados. Os modelos de aprendizado profundo absorvem informações de várias fontes de dados e analisam esses dados em tempo real, sem a necessidade de intervenção humana. No aprendizado profundo, as unidades de processamento gráfico (GPUs) são otimizadas para modelos de treinamento porque podem processar vários cálculos simultaneamente.

A *deep learning* é considerada um subcampo da *machine learning*, pois a *deep learning* surge de uma necessidade do aprendizado de máquina de fazer interpretações com grau mais alto de complexidade, porém mais palpáveis e que fossem também mais perceptivos que possam entender tais interpretações dentro do seu ambiente. A Figura 3 mostra a comparação entre *deep learning* e *machine learning* baseado na precisão de acordo com a quantidade de dados disponíveis.

Neste contexto, podem ser exemplificados o algoritmo de árvores de decisão e as redes neurais. As árvores de decisão funcionam basicamente com variáveis existentes em uma determinada situação e uma decisão diante de tais variáveis. Com esses dados deve ser possível tirar uma conclusão ou fazer uma previsão sobre algo. As árvores de decisão realizam divisão recursiva de um problema de maior complexidade em problemas mais simples, ou seja, aplicam a estratégia de divisão e conquista (LOPES, 2016).

Aprofundando sobre as redes neurais, que possuem uma inspiração biológica, ou seja, de acordo com o funcionamento do cérebro, deve ser entendido que o cérebro humano possui 86 bilhões de neurônios e com isso, cada neurônio faz em torno de 7 mil conexões com outros neurônios, sendo é possível imaginar o grau de complexidade disso, e quando o neurônio está enviando informação é porque ele está ativado e partir disso é possível fazer reconhecimento de padrões.

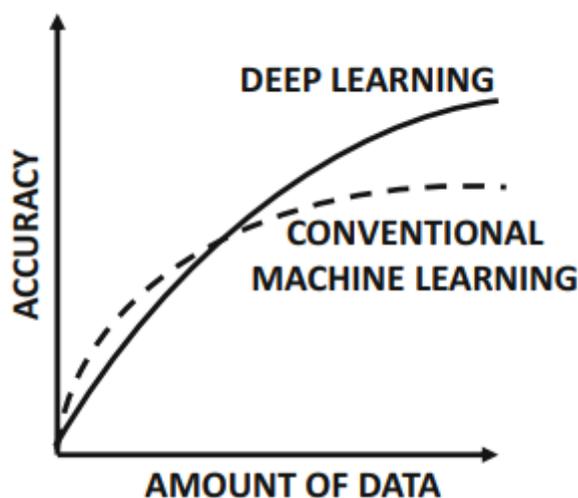


Figura 3 – Comparação da precisão entre *Deep Learning* e *Machine Learning*.

Fonte: (CHARU, 2018) <sup>3</sup>

Uma rede neural artificial simula o comportamento do cérebro humano, ou seja, redes neurais artificiais são modelos computacionais inspirados no sistema nervoso, que possuem a capacidade de manter a aquisição e manutenção do conhecimento, desta forma, consegue obter resultados de máquina muito expressivos. Mas é importante salientar que apesar da inspiração inicial no funcionamento do cérebro humano, as redes neurais artificiais apresentam um mecanismo de funcionamento bem diferente hoje em dia.

Uma arquitetura de *deep learning* tem como característica a utilização de uma grande camada interna de módulos mais simples chamados de *hidden layer* em que todos, ou grande parte destes módulos, estão sujeitos a aprendizado, e no final desta sucessão produzem dados de saída (GOODFELLOW; BENGIO; COURVILLE, 2016).

É possível associar os algoritmos de aprendizado de máquina como os métodos para a produção de H<sub>2</sub> por microrganismos. A produção de hidrogênio a partir de diferentes microrganismos tem sido reconhecida como uma solução eficiente devido ao fato de ser uma fonte inesgotável e por ter baixo custo de produção (SHOW et al., 2012).

Sobre a relação entre Indústria 4.0, computadores e IA, a evolução contínua dos PCs tem desempenhado um papel fundamental no avanço da inteligência artificial (IA), possibilitando avanços significativos em diversos campos. Uma das principais contribuições dos PCs é o aumento constante na capacidade de processamento. Os computadores modernos são capazes de lidar com grandes volumes de dados de maneira mais eficiente do que nunca, o que é essencial para o treinamento e a execução de modelos de IA. Em seu estudo intitulado "Inteligência Artificial e Aprendizado de Máquina: estado atual e tendências", Ludermir (2021) cita que:

As técnicas de IA que fazem sucesso hoje precisam de muito poder computacional e de muitos exemplos (dados), que não estavam disponíveis até pouco tempo. Agora

com as GPU (*Graphic Processing Unit*), maior poder computacional e muitos dados, as técnicas de IA conseguem resolver problemas cada vez mais complexos.

Além disso, a capacidade de armazenamento dos PCs também tem sido crucial para o avanço da IA. Com o crescimento exponencial no armazenamento de dados, os computadores agora podem armazenar conjuntos de dados massivos necessários para o treinamento de algoritmos de IA. Isso possibilita o desenvolvimento de modelos mais complexos e precisos, que podem lidar com tarefas cada vez mais desafiadoras.

A melhoria contínua das GPUs também desempenha um papel fundamental na evolução da IA. As GPUs são especialmente eficientes no processamento paralelo, o que é altamente benéfico para algoritmos de IA. A capacidade de realizar cálculos em paralelo acelera significativamente o treinamento de modelos de IA permitindo avanços mais rápidos e eficientes na área.

### 2.1.3 Instrumentação

A Indústria 4.0 trouxe uma revolução tecnológica que muda completamente a forma como a produção industrial é feita. A chave para essa mudança são as tecnologias de instrumentação sofisticadas, que são essenciais para a coleta, análise e interpretação de dados em tempo real. Essas inovações tornam possível controlar com precisão os processos industriais, aumentando a produtividade, a eficiência e a qualidade nas fábricas inteligentes.

A Indústria 4.0 depende da instrumentação, que está intimamente ligada a vários aspectos dessa revolução tecnológica. Na Indústria 4.0, os sensores inteligentes são uma parte vital da instrumentação, pois coletam dados precisos sobre fatores importantes como temperatura, pressão, fluxo e vibração em tempo real. Esses sensores podem ser conectados à rede, o que permite a coleta contínua de dados e enviá-los para sistemas de controle e análise.

Além disso, as redes de comunicação são essenciais para conectar os dispositivos na Indústria 4.0. Para garantir a transmissão segura e eficiente dos dados coletados pelos sensores, a instrumentação usa protocolos de comunicação como MQTT e Modbus. Os dispositivos podem se comunicar rapidamente e com confiança através dessas redes, o que permite a coordenação de ações e o compartilhamento de informações relevantes em tempo real.

A instrumentação também é essencial nos sistemas de controle e automação da Indústria 4.0. Por meio de sensores e atuadores inteligentes, a instrumentação permite monitorar e controlar os processos industriais em tempo real. Os sensores coletam os dados, enquanto os atuadores respondem aos comandos de controle para ajustar e otimizar o desempenho dos sistemas. A instrumentação fornece os dados e as informações necessárias para os algoritmos avançados, como controle preditivo e otimização, que melhoram a eficiência, a qualidade e a segurança dos processos industriais.

Além disso, esse pilar tecnológico desempenha um papel crucial na análise de dados em tempo real. A coleta massiva de dados na Indústria 4.0 requer uma capacidade eficiente de análise. A instrumentação fornece os dados em tempo real que são alimentados nos sistemas de análise de dados. Esses sistemas utilizam técnicas como *machine learning* e inteligência artificial para extrair informações relevantes, identificar padrões, prever falhas e otimizar os processos industriais. A instrumentação, portanto, desempenha um papel crítico na disponibilização de dados precisos para a análise em tempo real, possibilitando a tomada de decisões mais informadas e aprimorando a eficiência dos processos.

Assim como dito por [Korohodova e Petrenko \(2021\)](#), com base na análise de indústrias e serviços, é possível identificar e classificar segmentos diretamente relacionados à instrumentação da Ucrânia no modelo de negócios da Indústria 4.0. Dentre esses segmentos, destacam-se Dispositivos Inteligentes, Internet das Coisas, Internet Industrial das Coisas, M2M (Máquina a Máquina), Controle Avançado de Processos, Sistemas de Controle Industrial/Supervísório/Avançado, Sistema de Execução de Manufatura, CAD/CAM/CAE, Manufatura Aditiva e Impressão 3D, Realidade Aumentada, Big Data, sistema automatizado de medição de energia comercial, sistema automatizado de controle operacional. Embora esses processos compartilhem certa semelhança, cada um deles desempenha funções distintas.

Sendo assim, a Automação de Processos Robóticos (RPA) analisa extensos volumes de dados de processos de software, traduzindo-os em possíveis gatilhos para novas ações, respostas e comunicação com outros sistemas. A RPA, associada a robôs de software ou "*bots*", lida principalmente com tarefas digitais repetitivas baseadas em regras. Em contraste, a Automação de Processos Inteligente (IPA) habilita automaticamente funções de negócios, permitindo que os robôs aprendam durante a execução de suas tarefas. Dessa forma, a IPA demonstra maior inteligência e flexibilidade, uma vez que não é restrita por regras predefinidas. A forma mais avançada dessas automações é a operação de inteligência artificial (IA), que simula os processos de pensamento humano em todas as operações empresariais, sem intervenção manual. Ao contrário da RPA e da IPA, a operação de IA incorpora sistemas de autoaprendizagem mais avançados.

Por fim, a instrumentação também é fundamental para a segurança cibernética da Indústria 4.0. Os sistemas de instrumentação incluem mecanismos de proteção, como criptografia e autenticação, para garantir a segurança dos dados coletados e transmitidos. Além disso, a instrumentação possibilita a implementação de sistemas de monitoramento em tempo real para detectar atividades suspeitas e prevenir ataques cibernéticos. A segurança cibernética na Indústria 4.0 depende diretamente da instrumentação confiável e segura.

#### 2.1.4 Robótica

A indústria de robótica desempenhou um papel transformador em diversos setores desde a década de 1960 até os dias atuais. Inicialmente, os robôs eram predominantemente utilizados

em linhas de produção industrial, onde contribuía para aumentar a eficiência e a produtividade. No entanto, com o avanço tecnológico e as inovações contínuas, o uso de robôs expandiu-se para além da manufatura, alcançando uma ampla gama de indústrias.

Uma das principais mudanças impulsionadas pela tecnologia é a introdução de funções cooperativas em robôs, garantindo a segurança tanto para os trabalhadores quanto para os próprios robôs. Essas funções permitem uma colaboração segura entre humanos e robôs, abrindo caminho para uma nova era de automação colaborativa. Além disso, os robôs modernos possuem capacidades avançadas de movimento, sendo capazes de evitar obstáculos e até mesmo colisões com seres humanos, o que amplia ainda mais seu potencial de utilização em ambientes de trabalho variados.

Outra área de inovação significativa é o desenvolvimento da tecnologia de gêmeos digitais. Essa abordagem envolve a criação de modelos virtuais precisos de robôs e seus ambientes operacionais. Os gêmeos digitais permitem simulações realistas, análises preditivas e otimização de desempenho, contribuindo para aprimorar a eficiência e a qualidade das operações robóticas.

À medida que a indústria de robótica avança, as tecnologias emergentes, como a inteligência artificial (IA) e a Internet das Coisas (IoT), estão desempenhando um papel fundamental no desenvolvimento de robôs mais inteligentes e autônomos. A convergência dessas tecnologias está impulsionando a criação de robôs com capacidades cognitivas avançadas, permitindo que eles aprendam, tomem decisões e ajam de forma autônoma em diferentes contextos.

Essas inovações estão intrinsecamente ligadas à quarta revolução industrial, também conhecida como Indústria 4.0. Nesse contexto, a robótica desempenha um papel central ao impulsionar a automação inteligente, a integração de sistemas, a análise de dados em tempo real e a otimização de processos. A contínua evolução da indústria de robótica está moldando o futuro das operações industriais, promovendo a eficiência, a produtividade e a segurança em diversos setores.

No âmbito dos robôs industriais, observa-se uma crescente disseminação das simulações por meio dos chamados gêmeos digitais, abrangendo diversas indústrias, inclusive a Indústria 4.0. Concomitantemente, as tecnologias que imitam ou simulam ações humanas para o controle de robôs estão evoluindo de forma acelerada. A previsão aponta para um papel mais integral da próxima geração de robótica e das tecnologias correlatas, atendendo assim às demandas dinâmicas da fabricação colaborativa e inteligente no contexto tanto da Indústria 4.0 quanto da Internet das Coisas (IoT) (CHOI et al., 2022):

A indústria de robótica passou por uma trajetória de constante inovação, saindo das linhas de produção industrial para se tornar uma presença significativa em diversos setores. As tecnologias cooperativas, a avançada capacidade de movimento, os gêmeos digitais e a convergência com IA e IoT estão impulsionando o desenvolvimento de robôs mais inteligentes e autônomos. Essas transformações estão diretamente relacionadas à Indústria 4.0, permitindo a

automação inteligente e a otimização dos processos industriais.

Na década de 1950, emerge a robótica industrial, marcando seu início. Desde então, a utilização de robôs tem experimentado um rápido desenvolvimento no cenário industrial, desencadeando, assim, diversos fatores associados à automação industrial. A automação industrial, impulsionada por esses fatores, possibilitou que os robôs desempenhassem tarefas progressivamente mais complexas, alcançando níveis elevados de precisão e eficiência econômica crescente. Em outras palavras, a presença da robótica industrial está cada vez mais evidente nos termos relacionados à Indústria 4.0 (INDUSTRIA, 2019).

As empresas têm observado as vantagens do uso de robôs industriais em substituição ao trabalho humano e a capacidade de aprendizado deles, torna as tarefas mais eficiente. Segundo o portal Educação (2023):

Para os detentores dos meios de produção, a utilização de máquinas é mais vantajosa, visto que, além da produção ocorrer de forma mais rápida, a folha salarial é reduzida e, conseqüentemente, a lucratividade é maior. Os robôs, apesar de passarem por manutenções, são mais benéficos para as empresas, pois, diferentemente dos operários, não adoecem, não tiram férias, não engravidam, não necessitam de descanso, não recebem salário, não reclamam da função, entre outros fatores.

## 2.2 Evolução da Indústria 4.0 no Brasil

A Quarta Revolução Industrial, vem desempenhando um papel fundamental na transformação e modernização do setor produtivo do país. Ao combinar tecnologias avançadas, automação, conectividade e inteligência artificial, a Indústria 4.0 tem impulsionado a eficiência, a produtividade e a competitividade das empresas brasileiras.

Nos últimos anos, o Brasil tem dado passos importantes para adotar e implementar os princípios da Indústria 4.0 em diversos setores. As empresas estão buscando maneiras de aproveitar as vantagens oferecidas por tecnologias como a Internet das Coisas (IoT), a computação em nuvem, a inteligência artificial e a robótica colaborativa. Essas inovações estão revolucionando os processos de produção, a logística, o gerenciamento da cadeia de suprimentos e até mesmo o relacionamento com os clientes.

Em Contador et al. (2020) os autores relatam que:

Atualmente, algumas empresas de diferentes setores estão implementando iniciativas típicas da Indústria 4.0, principalmente aquelas do setor de manufatura. A Indústria 4.0 tem recebido muita atenção nos últimos anos (Quezada et al. (2017), Xu, Xu e Li (2018) e Frank, Dalenogare e Ayala (2019)) devido ao seu potencial para mudar o sistema de produção, passando de processos centralizados e analógicos para fluxos de trabalho descentralizados e digitais, integrando máquinas, fornecedores, clientes

e interessados, bem como dados, visando uma maior flexibilidade, produtividade e competitividade (RAJ et al., 2020).

Um exemplo concreto do impacto da Indústria 4.0 no Brasil é o setor automotivo. As montadoras estão implementando sistemas de produção inteligentes, nos quais máquinas interconectadas, sensores e algoritmos avançados permitem uma produção mais eficiente e personalizada. Além disso, a manutenção preditiva, baseada em análise de dados em tempo real, tem ajudado a reduzir custos e evitar paradas não programadas nas linhas de produção.

No setor metalúrgico, beneficiamento por meio da Indústria 4.0 também é claro. Por meio do uso de sensores avançados, análise de dados e automação, as empresas brasileiras desse ramo estão aprimorando a eficiência na utilização de recursos, otimizando processos de produção, monitorando a qualidade dos produtos e identificando de forma precoce possíveis falhas ou irregularidades. Essas tecnologias estão impulsionando a produtividade e a sustentabilidade do setor, contribuindo para o crescimento econômico e a competitividade, além de promover avanços na qualidade e segurança dos produtos metalúrgicos.

Apontando a exploração mineral, agora está sendo possível obter informações precisas sobre a qualidade e a composição dos minérios, permitindo uma seleção mais eficiente das áreas de extração e uma otimização dos recursos utilizados. Além disso, a análise de dados em tempo real contribui para a identificação de padrões e tendências, possibilitando uma melhor tomada de decisões no planejamento e na operação das minas. A utilização de equipamentos autônomos, como caminhões e perfuratrizes controlados por sistemas computadorizados, aumenta a eficiência operacional e reduz o risco de acidentes para os trabalhadores. Ademais, outras técnicas atuais como a robótica tem sido aplicada em atividades perigosas e de difícil acesso, permitindo a realização de tarefas de forma mais segura e eficiente.

Outro setor que tem se beneficiado da Indústria 4.0 é o agronegócio. Com o uso de sensores, drones e análise de dados, os agricultores brasileiros estão melhorando a eficiência no uso de insumos, otimizando a irrigação, monitorando o crescimento das culturas e detectando precocemente pragas e doenças. Essas tecnologias têm impulsionado a produtividade e a sustentabilidade do setor, contribuindo para a segurança alimentar e o crescimento econômico.

Apesar dos avanços, ainda há desafios a serem superados para que a Indústria 4.0 se estabeleça plenamente no Brasil. Um desses desafios é a infraestrutura de conectividade, que precisa ser expandida e aprimorada para permitir a troca rápida e segura de dados entre máquinas, equipamentos e sistemas. Além disso, é fundamental investir em capacitação e formação de profissionais qualificados, capazes de lidar com as novas tecnologias e promover a transformação digital nas empresas. Existem desafios expressivos para as empresas de manufatura implementarem a Indústria 4.0, que envolve não apenas o aspecto tecnológico, mas também os aspectos organizacionais e gerenciais (HORVÁTH; SZABÓ, 2019). De acordo com Contador et al. (2020):

Uma das principais barreiras organizacionais é a resistência da gerência intermediária e dos funcionários, pois a introdução das tecnologias da Indústria 4.0 também pode mudar as funções de gestão, causando impacto na cultura organizacional [Birkel et al. \(2019\)](#); [Horváth e Szabó \(2019\)](#); [Raj et al. \(2020\)](#), sendo necessário que o sistema de produção demande novas competências dos funcionários.

O governo brasileiro tem reconhecido a importância da Indústria 4.0 e tem buscado criar um ambiente propício para o seu desenvolvimento. Iniciativas como o Plano Nacional de Internet das Coisas e o Programa Indústria 4.0 têm como objetivo estimular a adoção e a difusão dessas tecnologias em todo o país, promovendo a inovação, a competitividade e o crescimento econômico sustentável.

A evolução da Indústria 4.0 no Brasil tem sido marcada por avanços significativos em diversos setores. As empresas estão cada vez mais conscientes das vantagens competitivas que a adoção dessas tecnologias pode trazer. Com investimentos adequados, infraestrutura sólida e qualificação profissional, o país tem o potencial de se tornar uma referência na Indústria 4.0, impulsionando o crescimento econômico e a qualidade de vida de sua população.

### **2.3 Evolução da indústria automobilística**

O processo de evolução da indústria automobilística foi bastante interessante ao longo do tempo e muito importante para a economia e indústria mundiais e continua a ser aperfeiçoada de forma constante.

Há mais de um século, o empreendedor Henry Ford nutria a aspiração de fabricar um automóvel acessível para o cidadão comum. Visando popularizar o uso de carros, dedicou-se ao estudo de métodos de produção e concluiu que a produção em massa exigia uniformidade. Em busca da eficiência produtiva, adotou a abordagem em que, em vez de o trabalhador se deslocar até a tarefa, a tarefa deveria ser levada até ele ([RODAS, 2021](#)).

A indústria automotiva no Brasil começou por volta dos anos 50 quando muitos empresários procuraram na Europa algum projeto para adaptar em terras Brasileiras. Conforme o portal [Infoescola \(2023\)](#) “A indústria automotiva está presente no Brasil desde o início do século XX, e passa a atuar de forma direta em território nacional a partir da década de 50 do mesmo século.”

Atualmente, o Brasil possui 20 empresas competindo em um lucrativo mercado, com 65 fábricas em 11 estados, que somam a capacidade instalada de 4,5 milhões de veículos por ano e cerca de 5.500 concessionárias. O Brasil exporta cerca de 22% de sua produção e a indústria emprega 126 mil pessoas ([TGPOLI, 2019](#)).

A Indústria 4.0 está desempenhando um papel transformador no setor de produção automobilística em todo o mundo. Com a adoção de tecnologias avançadas, como IoT, inteligência artificial e automação, as fábricas de automóveis estão passando por uma revolução digital.

A aplicação da Indústria 4.0 na indústria automobilística traz uma série de benefícios e melhorias significativas nos processos de fabricação, qualidade dos produtos e experiência do cliente. A manufatura inteligente é um dos principais aspectos dessa transformação, permitindo a criação de fábricas inteligentes e conectadas. Máquinas, sistemas de produção e processos são interconectados, resultando em uma produção mais flexível, eficiente e personalizada.

Na Indústria 4.0 automobilística, a IoT desempenha um papel fundamental ao permitir a conectividade entre máquinas, sensores e dispositivos. Essa interligação em tempo real viabiliza a coleta de dados sobre o desempenho dos veículos, condições de operação e manutenção preditiva, enquanto melhora a comunicação entre veículos e infraestrutura para aprimorar a segurança e a eficiência no trânsito.

Além disso, a análise de dados é uma área essencial impulsionada pela Indústria 4.0 no setor automobilístico. Com grandes volumes de dados gerados em todas as etapas da cadeia de produção, a análise avançada de dados e o uso de técnicas de inteligência artificial fornecem insights valiosos para otimizar os processos de fabricação, aprimorar a qualidade e reduzir custos, garantindo eficiência operacional.

A automação também desempenha um papel crucial nesse cenário. Robôs e sistemas autônomos estão sendo cada vez mais empregados em tarefas complexas e repetitivas, melhorando a eficiência e a precisão da produção. Os avanços na robótica colaborativa e na interação homem-máquina promovem uma colaboração mais estreita entre humanos e máquinas nas linhas de produção, aumentando a produtividade e garantindo uma resposta mais ágil às demandas do mercado.

A Indústria 4.0 também impulsiona a manutenção preditiva, permitindo que as empresas monitorem constantemente o desempenho dos veículos e prevejam falhas antes que ocorram. Isso resulta em agendamento proativo de manutenção, reduzindo o tempo de inatividade e os custos associados.

No setor automobilístico, a Indústria 4.0 está trazendo uma revolução na forma como os veículos são fabricados, operados e mantidos. À medida que mais empresas adotam essas tecnologias avançadas, é esperado que a indústria automobilística continue a evoluir, impulsionando a inovação e melhorando a eficiência em toda a cadeia de produção.

Estudando sobre a importância da Indústria 4.0 no cenário automobilístico, [Ruggero et al. \(2019\)](#) dizem que:

Quatro elementos (tipos de inteligência) são destacados para a transição para a Indústria 4.0, são eles: Manufatura Inteligente, que busca transformar a máquina mais inteligente e avançada por meio de novas tecnologias; Produtos e Serviços Inteligentes, que lidam com a conectividade de produtos e serviços digitais, optando pela comunicação e coleta de dados entre empresas e clientes; Trabalho Inteligente, que utiliza tecnologias para melhorar a eficiência do trabalho; e a Cadeia de Su-

primentos Inteligente, representada pela integração externa na cadeia de valor. No entanto, para que esses fundamentos façam parte da Indústria 4.0, eles precisam ser suportados pela Internet das Coisas e por tecnologias mais avançadas, gerando conectividade e sistemas de negócios mais eficientes <sup>4</sup>.

Um dos principais polos industriais automotivos do país, é a planta FIAT do grupo Stellantis localizado em Betim – MG. Apesar da inauguração da fábrica em 1976, esta possui uma classificação “Prata” pelo *World Class Manufacturing* (WCM), que se trata de um exigente sistema de produção criado no início dos anos 2000 para padronizar e nivelar por cima os processos de produção. Essa classificação deve ser observada de perto devido aos R\$7 bilhões de reais investidos no processo de modernização. Uma comparação interessante fica a cargo do Polo Automotivo Jeep em Goiana - PE, que foi inaugurado dentro da Indústria 4.0 em 2015 e possui a mesma classificação prata do Polo Automotivo FIAT em Betim – MG.

A Figura 4 ilustra os robôs em uma linha de produção da indústria automotiva:

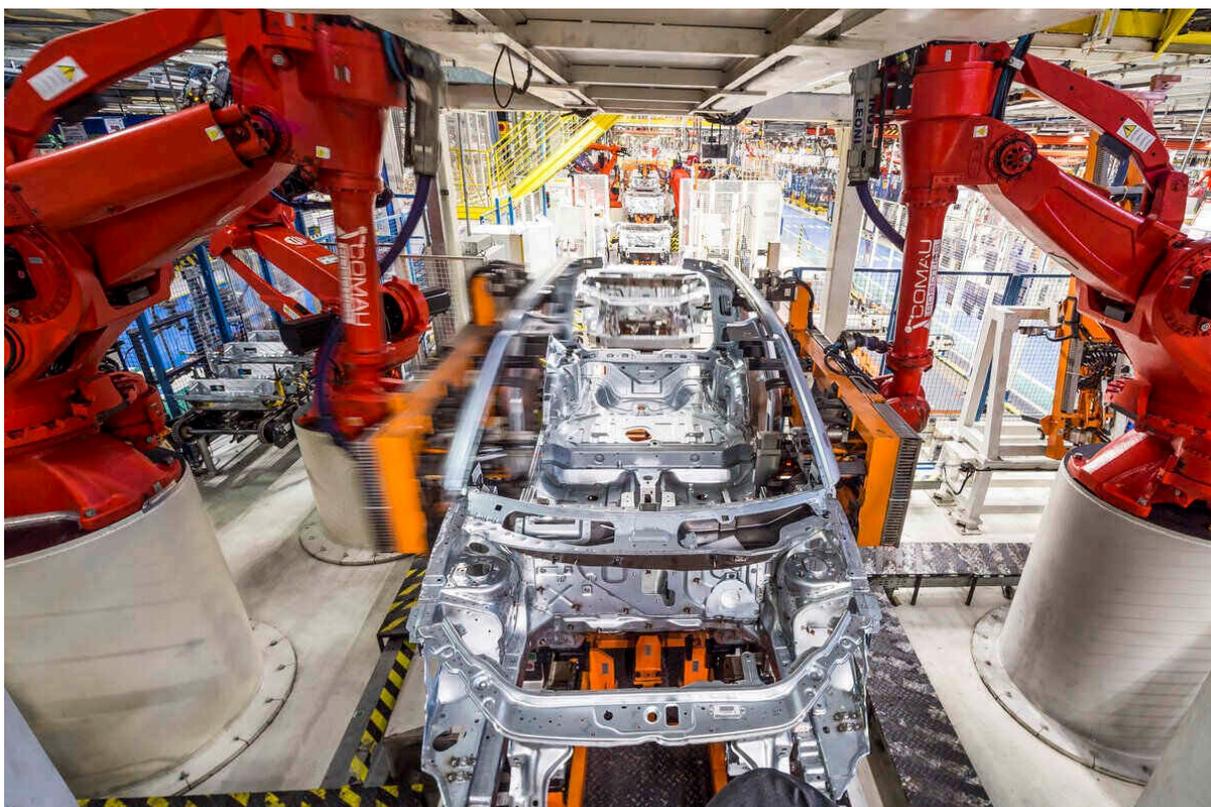


Figura 4 – Robôs na linha de produção da planta FIAT em Betim.

Fonte: Automotive Business. <sup>5</sup>

---

<sup>4</sup>(NEO: Núcleo de Engenharia Organizacional, 2018)

<sup>5</sup><https://www.automotivebusiness.com.br/pt/posts/betim-a-fantastica-fabrica-da-fiat/>

## 2.4 Evolução da indústria metalúrgica

A indústria metalúrgica passou por uma notável evolução com a chegada da Indústria 4.0. Como já citado, esse termo se refere a uma nova era da produção industrial, marcada pela integração de diversas tecnologias avançadas. Em seu estudo sobre inovações tecnológicas e a Indústria 4.0, [Martins, Paula e Botelho \(2021\)](#) dizem que:

Os avanços no conhecimento de como as inovações se desenvolvem na indústria siderúrgica destacam seu caráter de indústria madura, na qual rupturas tecnológicas são raras e as inovações incrementais de processos são relevantes para a modernização da base tecnológica. Por exemplo, as últimas três inovações radicais no setor (o desenvolvimento da usina siderúrgica de oxigênio básico, a fundição contínua e a maior difusão da usina siderúrgica elétrica) remontam aos anos 1950 e 1960. Portanto, há um baixo grau de oportunidade para inovação, resultante da exploração de algumas trajetórias tecnológicas que têm sido dominantes por várias décadas. [Pinho \(2001\)](#) destaca que as principais inovações tecnológicas do processo siderúrgico foram desenvolvidas em iniciativas que combinaram os esforços e capacidades de usinas siderúrgicas, fabricantes de equipamentos e institutos de pesquisa públicos.

Com a aplicação de tecnologias como internet das coisas, inteligência artificial, *big data*, computação em nuvem e robótica, a indústria metalúrgica tem se beneficiado de um aumento significativo na eficiência e na produtividade. As máquinas e equipamentos são capazes de se comunicar e trocar informações em tempo real, permitindo um melhor controle e monitoramento dos processos de produção. Isso resulta em uma redução de erros e retrabalhos, e otimiza os recursos utilizados.

A automação é um dos pilares da Indústria 4.0, e na indústria metalúrgica isso se traduz em máquinas inteligentes e, principalmente sistemas de controle avançados. Um sistema supervisório automatizado, por exemplo, consiste em um conjunto de *softwares e hardware* que coletam dados de sensores e dispositivos instalados nas máquinas e equipamentos da indústria metalúrgica. Esses dados são então processados e apresentados de forma visual em uma interface homem máquina (IHM), possibilitando que os operadores acompanhem e controlem os processos de produção.

Outro aspecto importante é a possibilidade de personalização em massa. Com a flexibilidade proporcionada pelas tecnologias digitais, a indústria metalúrgica pode adaptar-se facilmente às demandas dos clientes, produzindo peças e produtos personalizados de acordo com suas necessidades. Isso abre novas oportunidades de negócio e fortalece a competitividade do setor além de possibilitar a redução de danos causados ao meio ambiente e, conseqüentemente para a sociedade onde estão inseridos os polos industriais.

A oportunidade significativa que a Indústria 4.0 apresenta permite que as indústrias siderúrgicas prossigam em seu crescimento de maneira sustentável. A partir de 2013, as aplicações da Indústria 4.0 têm recebido prioridade no RFCS - Fundo de Pesquisa para Carvão e Aço - que é o programa de pesquisa voltado para as indústrias siderúrgicas (TOLETTINI; LEHMANN, 2020).

Contudo, é importante ressaltar que a implementação da Indústria 4.0 na indústria metalúrgica não se resume apenas à adoção de novas tecnologias e enfrenta desafios específicos. A natureza intensiva em capital do setor e a necessidade de atualização tecnológica representam obstáculos que requerem investimentos financeiros significativos e em capacitação profissional para garantir o sucesso dessa transformação. Os profissionais devem estar preparados para lidar com as novas tecnologias e processos, além de compreender os desafios e oportunidades que surgem nesse novo cenário.

A indústria metalúrgica tem sido impactada positivamente pela Indústria 4.0, que trouxe avanços significativos em termos de eficiência, produtividade e personalização. A integração de tecnologias avançadas e a automação dos processos têm proporcionado uma maior competitividade e a possibilidade de atender às demandas do mercado de forma mais ágil. A evolução da indústria metalúrgica com a Indústria 4.0 é um reflexo do constante avanço tecnológico e da busca pela excelência na produção industrial.

## **2.5 Evolução da indústria mineral**

A indústria mineral, impulsionada pela revolução da Indústria 4.0, experimentou uma transformação notável em suas práticas e operações. A integração de tecnologias avançadas, como IoT, inteligência artificial, BI e automação, redefiniu a maneira como a extração e processamento de minerais são feitos.

A automação entrou como uma força motriz na indústria mineral. Equipamentos autônomos e sistemas robóticos dotados de sensores sofisticados, agora desempenham um papel vital nas operações de mineração. Isso não apenas aumentou a eficiência, mas também melhorou a segurança dos trabalhadores, permitindo a realização de tarefas perigosas sem exposição direta.

A coleta massiva de dados tornou-se uma prática padrão, proporcionando às empresas uma visão profunda dos processos de mineração. Sensores estrategicamente colocados em máquinas e locais específicos monitoram variáveis cruciais, como temperatura, pressão e composição do solo. Esses dados são processados em tempo real, o que permite uma adaptação rápida às condições em constante mudança.

A rapidez no acesso às informações proporciona benefícios substanciais aos tomadores de decisão. Essa agilidade permite a análise de diversas perspectivas, a avaliação de cenários múltiplos e a identificação de tendências e padrões que podem impactar o processo decisório. Além disso, as tecnologias de informação disponibilizam recursos avançados de análise e

visualização de dados, simplificando a compreensão e interpretação das informações disponíveis (LEÃO et al., 2023).

A manutenção preditiva é um dos frutos mais valiosos dessa mudança. Ao analisar padrões nos dados coletados, as empresas conseguem prever quando um equipamento pode falhar e realizar a manutenção antes que ocorra uma parada não planejada. Isso não apenas reduz os custos de manutenção, mas também aumenta a disponibilidade operacional.

A realidade virtual e aumentada também encontrou aplicação na indústria mineral. Os operadores agora podem utilizar essas tecnologias para treinamento e simulação, permitindo a familiarização com equipamentos complexos e cenários de mineração antes mesmo de entrar no campo. Isso não apenas acelera a curva de aprendizado, mas também contribui para a segurança operacional. Outra utilização significativa da realidade virtual aumentada é a estimativa de qualidade e projeção de cavas através de sondagem do solo. De acordo com Dias (2023):

Alguns benefícios da Realidade Aumentada (AR) e da Realidade Virtual (VR) na mineração 4.0 incluem o treinamento e simulação pois podem ser usados para treinar os trabalhadores de mineração, simulando situações de risco sem expô-los a perigos reais o que causa o aumento da segurança dos trabalhadores reduz o tempo e custos de treinamento, visualização e planejamento pois podem ser usadas para visualizar e planejar a mina, permitindo que os trabalhadores vejam como a mina será antes mesmo de ser construída podendo ajudar na identificação de problemas e oportunidades de melhoria antes de iniciar as operações.

A Figura 5 ilustra a citação acima de Dias (2023), representando a funcionalidade da realidade virtual para treinamento em mina:

A rastreabilidade na cadeia de suprimentos tornou-se mais transparente e eficiente graças ao *blockchain*. Isso é especialmente crucial na indústria mineral, onde a origem e qualidade dos minerais são questões críticas. A *blockchain* permite uma documentação constante de cada transação, desde a extração até a produção final, promovendo práticas éticas e sustentáveis.

A personalização da produção também está se tornando uma realidade na indústria mineral 4.0. Com algoritmos avançados, as empresas podem ajustar seus processos para atender a demandas específicas, produzindo minerais com características personalizadas para atender às necessidades dos clientes.

Apesar disso, a implementação eficaz dessas tecnologias não é isenta de desafios. A necessidade de investimentos significativos em infraestrutura digital e a adaptação dos trabalhadores às novas tecnologias são obstáculos que precisam ser superados. A segurança cibernética também emerge como preocupação crítica na era digital.

---

<sup>6</sup>[https://www.immersivetechologies.com/news/news2021/Revolutionizing-Supervisor-Training-WorksiteVR-Mine-Standards-Training\\_PT.htm](https://www.immersivetechologies.com/news/news2021/Revolutionizing-Supervisor-Training-WorksiteVR-Mine-Standards-Training_PT.htm)



Figura 5 – Treinamento de Práticas na Mina da empresa Immersive Technologies.

Fonte: Immersive Technologies. <sup>6</sup>

A Indústria 4.0 está deixando uma marca permanente também na indústria mineral, remodelando radicalmente a maneira como os minerais são extraídos, processados e utilizados. À medida que a tecnologia continua a avançar, a indústria mineral se prepara para um futuro mais eficiente, seguro e sustentável.

### 3 AVALIAÇÃO DE APLICAÇÕES DA INDÚSTRIA 4.0 NOS SETORES AUTOMOBILÍSTICO, METALÚRGICO E MINERAL

A revolução proporcionada pela Indústria 4.0 nos setores automobilístico, metalúrgico e mineral evidencia um cenário transformador, sustentado por resultados concretos obtidos por meio da implementação dessas tecnologias inovadoras. Ao explorar casos reais, é possível perceber de maneira mais tangível o impacto positivo experimentado por empresas que adotaram as práticas da quarta revolução.

A Pesquisa Global da Indústria 4.0 realizada com mais de duas mil empresas em 26 países no ano de 2016 pela [PricewaterhouseCoopers \(2016\)](#), apontou que mais de 50% dos fabricantes destacaram aprimoramento da qualidade e aumento na capacidade de produção como vantagens da digitalização. Dessa metade, cerca de 49% mencionaram explicitamente a diminuição nos custos operacionais, enquanto 33% dos fabricantes afirmaram ter observado uma redução nos custos da cadeia de suprimentos desde que iniciaram investimentos em transformação digital.

Aprofundando um pouco mais na pesquisa, foi possível entender que as empresas pioneiras na implementação das novas tecnologias são quase três vezes mais bem-sucedidas em combinar aumentos significativos na receita com ganhos expressivos na redução de custos. Além disso, olhando para os setores que são objetos de estudo deste trabalho de 2016 a 2020, a indústria automotiva, metalúrgica e logística (voltada para o setor mineral) tinham como perspectiva reduzir \$28 bi, \$54 bi e \$61 bi por ano nos seus custos operacionais, respectivamente.

A seguir são discutidos alguns exemplos de aplicações atuais das tecnologias da Indústria 4.0 nos setores automobilístico, metalúrgico e mineral com resultados positivos.

#### 3.1 Setor Automotivo

Na indústria automobilística atual, a adoção de tecnologias da Indústria 4.0 é essencial para alcançar competitividade de mercado. A integração de soluções inovadoras, como automação, análise de dados em tempo real e inteligência artificial, proporciona eficiência operacional e adaptabilidade às mudanças nas demandas do mercado. A coleta e interpretação de dados ao longo da cadeia de produção oferecem *insights* valiosos, otimizando processos e elevando padrões de qualidade. Empresas que abraçam essas inovações estão estrategicamente posicionadas para enfrentar desafios competitivos e se destacar em um mercado global dinâmico.

Em um estudo de caso da Indústria 4.0 sobre a aplicação dessas tecnologias em uma indústria automobilística, é possível notar benefícios na linha de produção de veículos da Volkswagen, onde cada automóvel é acompanhado de uma *Tag RFID*. Esse dispositivo permite acessar informações armazenadas no servidor e possibilita a inclusão e gravação de novos dados ao longo do processo de manufatura. Quando o veículo chega a um posto de trabalho,

suas informações são transmitidas por rádio frequência através de antenas e gera uma troca de informações entre o sistema físico e os sistemas virtuais. Com a verificação do modelo, versão e motorização do veículo, as máquinas, robôs e dispositivos tomam decisões em tempo real para realizar as diferentes operações do sistema de manufatura (MENDES; SIEMON; CAMPOS, 2017).

A interseção da Indústria 4.0 e a indústria automobilística, como evidenciado no estudo de caso da Volkswagen, destaca a transformação significativa catalisada por tecnologias inovadoras. A presença da *Tag RFID* na linha de produção não apenas ilustra a implementação prática dessas soluções, mas também ressalta a relevância crítica da integração de automação e análise de dados em tempo real. A capacidade de tomar decisões instantâneas com base na verificação detalhada do veículo demonstra como as empresas que adotam essas inovações estão na vanguarda da eficiência operacional, adaptabilidade e, em última análise, competitividade em um cenário global dinâmico. Este caso de estudo reforça a noção de que a Indústria 4.0 é um catalisador fundamental para a excelência na indústria automobilística, estabelecendo um paradigma para o futuro da produção automotiva.

Outra aplicação interessante da Indústria 4.0 está ilustrada na Figura 6. Segundo *Futuretransport* (2017), em questão de segundos, um robô com sensores a laser mede toda carroceria. Em seguida, esse robô “conversa” com o sistema para cruzarem dados e decidirem se o veículo está perfeito. Se verificarem que sim, ele segue; se não, a linha para.



Figura 6 – Linha de produção da Volkswagen em São Bernardo do Campo - SP.

Fonte: *Futuretransport* (2017).

### 3.2 Setor Metalúrgico

Uma aplicação prática do conceito da Indústria 4.0 no setor metalúrgico é feita no estudo de *Miśkiewicz e Wolniak* (2020), no qual foi desenvolvido um sistema para monitorar o uso de

ativos móveis tanto em espaços abertos quanto fechados. Este sistema possui três módulos: o primeiro para monitoramento de equipes, o segundo para monitoramento de veículos e o terceiro para supervisão de ferramentas. Os autores utilizam computação em nuvem segura (da Microsoft Azure) para registro de dados e comunicação.

Dentre suas diversas aplicações, o *software* é utilizado para identificação em intervenção humana, detecção de imobilidade para reporte de emergências, detecção de funcionários através de zonas de controle designadas nas instalações da empresa e monitoramento da operação de caminhões (distância percorrida, tempo efetivo de trabalho, presença em zonas específicas, histórico de eventos e localização atual do caminhão). Sendo assim, no painel de controle foi possível visualizar a área ao redor dos fornos A e B em busca de objetos e pessoas, permitindo ao controlador monitorar em tempo real o carregamento dos fornos, comportamentos indesejados e eficiência dos funcionários. O painel também facilitou a coordenação da operação do chão de fábrica e a análise de dados detalhados sobre o desempenho dos colaboradores.

Os autores concluíram que após a conclusão da primeira fase do projeto, a análise visou avaliar a eficácia econômica das soluções implementadas, com foco especial nas áreas de consumo de energia e material, que representam mais de 60% dos custos de produção na metalurgia. A implementação das ferramentas de Indústria 4.0 da empresa tinha como objetivo racionalizar esses aspectos, buscando aumentar a competitividade no mercado. Ao final da primeira fase do projeto em 2019, observou-se uma melhoria na eficiência energética em comparação com 2018. Nos casos dos fornos A e B, a eficiência foi aprimorada em 0,58% e 5,87%, respectivamente. A diferença notável no consumo de energia entre os dois fornos foi devido ao fato de que o último não operou com capacidade total durante o período auditado. Durante o período considerado, registrou-se uma redução no consumo de matérias-primas na produção: 2,3% para o forno A e 5,3% para o forno B.

### 3.3 Setor Mineral

Na mineração a inserção da Indústria 4.0 não é diferente. A Vale, quinta maior mineradora do mundo em valor de marca, ao apresentar seu relatório de vendas do quarto trimestre de 2023, trouxe números consideráveis que chamaram atenção por dezembro ter tido a maior produção de minério de ferro da empresa desde 2018. Em uma explicação no [Relatório \(2024\)](#), a multinacional diz que:

A produção do Sistema Norte aumentou 3,8 Mt a/a e 0,7 Mt, refletindo os resultados positivos das iniciativas contínuas para melhoria da confiabilidade de ativos e a estabilidade operacional em Serra Norte e no S11D.

Analisando a afirmação, é importante ressaltar que a introdução de tecnologias da Indústria 4.0, em particular a adoção de correias transportadoras tecnológicas no S11D em

substituição aos caminhões, desempenhou um papel crucial nesse aumento, contribuindo para eficiências operacionais e para o crescimento global na produção do Sistema Norte.

Outra aplicação relevante para o setor mineral é a utilização de robôs para prospecção de mina. Em resposta às necessidades de inspeção, especialmente focadas em questões de saúde e segurança, em um estudo realizado por [Sathler \(2023\)](#) viu-se que a utilização de robôs oferece a vantagem de conduzir medições altamente precisas sem expor operadores a ambientes perigosos, nesse sentido utilizou-se os robôs para mapear os gases nocivos presentes em ambientes de mineração e cavidades naturais. A Figura 7 mostra a utilização de um robô de prospecção na mina.



Figura 7 – EspeleoRobo em prospecção de mina.

Fonte: ([CID et al., 2020](#)).

### 3.4 Discussão

Diante desses exemplos, percebe-se que os benefícios da Indústria 4.0 vão além de conceitos abstratos; são conquistas palpáveis que transformam a realidade operacional e a saúde financeira das empresas nos setores automobilístico, metalúrgico e mineral. Na indústria automobilística, por exemplo, a adoção de tecnologias como a automação avançada e a robótica colaborativa tem levado a uma produção mais eficiente e flexível, reduzindo custos e tempo de produção. No setor metalúrgico, a implementação de sistemas de monitoramento remoto e análise de dados em tempo real tem permitido um controle mais preciso dos processos de produção, resultando em uma melhoria na qualidade dos produtos e na redução de desperdícios. Já no setor mineral, a utilização de tecnologias de sensoriamento remoto e automação tem aumentado a segurança dos trabalhadores e otimizado a extração e processamento de minérios, tornando as

operações mais eficientes e sustentáveis. Essas mudanças não apenas aumentam a competitividade das empresas, mas também contribuem para o avanço tecnológico e o desenvolvimento econômico desses setores.

No entanto, a conscientização sobre os desafios e as ações práticas para superá-los são fundamentais para garantir que o Brasil consolide sua posição como protagonista na era da Indústria 4.0. Em um cenário global cada vez mais competitivo e tecnologicamente avançado, é imperativo que as empresas e instituições brasileiras estejam plenamente conscientes dos desafios que enfrentam e das medidas necessárias para enfrentá-los de maneira eficaz. A rápida evolução das tecnologias disruptivas, como inteligência artificial, internet das coisas e computação em nuvem, exige uma resposta ágil e estratégica por parte das organizações brasileiras para se manterem relevantes e competitivas no mercado internacional.

Esses casos reais destacam a necessidade de um comprometimento contínuo com a inovação, investimentos direcionados e uma abordagem estratégica para colher os frutos duradouros dessa revolução industrial. Empresas bem-sucedidas na adoção da Indústria 4.0 têm demonstrado um compromisso firme com a pesquisa e desenvolvimento, investindo em talentos e recursos tecnológicos de ponta para impulsionar sua capacidade de inovação e adaptabilidade. Além disso, é essencial que as políticas públicas estejam alinhadas com as demandas e oportunidades dessa nova era, incentivando investimentos em infraestrutura digital, educação especializada e regulamentações que promovam um ambiente favorável à inovação e ao empreendedorismo. Somente por meio de um esforço conjunto entre setor público e privado, o Brasil poderá efetivamente capitalizar as oportunidades oferecidas pela Indústria 4.0 e assegurar seu papel de destaque no cenário global da inovação e tecnologia.

## 4 CONCLUSÃO

A revolução proporcionada pela Indústria 4.0 nos setores automobilístico, metalúrgico e mineral evidencia um cenário transformador que redefine as práticas industriais tradicionais. Os resultados positivos observados, como o aumento da eficiência operacional, segurança, a personalização da produção de acordo com as demandas do mercado e os avanços significativos na segurança dos processos, apontam para uma tendência de contínua evolução tecnológica nesses setores-chave da economia.

A eficiência operacional aprimorada, impulsionada pela automação e integração de máquinas, não apenas reduziu os custos de produção, mas também abriu espaço para uma produção mais ágil e adaptável. A capacidade de responder rapidamente às mudanças nas condições do mercado, proporcionada pela rápida tomada de decisões baseada em dados em tempo real, fortalece a posição competitiva das indústrias brasileiras.

A personalização em massa, possibilitada pela flexibilidade dos sistemas da Indústria 4.0, não só atendeu às crescentes expectativas dos consumidores por produtos mais personalizados, mas também contribuiu para a redução de estoques e minimização de desperdícios, gerando benefícios econômicos e ambientais.

Sendo assim, ao longo deste trabalho, foram abordadas questões fundamentais relacionadas à evolução industrial desde suas origens na Indústria 1.0 até a era atual da Indústria 4.0. Por meio de uma revisão da literatura, foi possível contextualizar essa evolução com foco na Indústria 4.0, compreendendo os marcos históricos e as transformações que levaram à atual revolução industrial. Além disso, foram realizados estudos sobre os pilares da Indústria 4.0, destacando seu papel fundamental na sustentação das tecnologias aplicadas nos setores automobilístico, metalúrgico e mineral como visto nos exemplos citados. Por meio da análise desses setores, foi possível elucidar como a Indústria 4.0 tem sido implementada e adotada, proporcionando melhorias significativas em processos e resultados. Todo esse conhecimento foi adquirido por meio de pesquisas realizadas, baseadas nas contribuições de diversos autores e especialistas no campo, consolidando assim uma compreensão abrangente e fundamentada sobre a temática em questão.

Entretanto, a manutenção desses sistemas avançados necessita de uma equipe qualificada e atualizada, capaz de lidar com as complexidades das novas tecnologias, garantindo a estabilidade operacional e, principalmente, a segurança dos dados.

O futuro desses setores está intrinsecamente ligado à capacidade de superar esses desafios. O comprometimento com a inovação, aliado a investimentos estratégicos, não apenas consolida os ganhos já alcançados, mas também posiciona o Brasil como um protagonista na era da Indústria 4.0. Ao enfrentar os desafios de frente, as indústrias brasileiras têm a oportunidade não

apenas de se manterem relevantes no mundo, mas também de ser exemplo na transformação industrial, impulsionando o crescimento econômico sustentável e a excelência tecnológica no cenário internacional.

Assim sendo, conclui-se que empresas que permanecem enclausuradas em limitações não conseguirão alcançar a integração fundamental na era da Indústria 4.0. Cultivar um ambiente digital demanda uma liderança comprometida, e a transformação digital só se concretizará se a alta administração atribuir prioridade à Indústria 4.0 para superar os desafios iniciais dos projetos, onde é exigido que as empresas desenvolvam competências e integrem processos automatizados.

## REFERÊNCIAS

- BIRKEL, H. S. et al. Development of a risk framework for industry 4.0 in the context of sustainability for established manufacturers. *Sustainability*, 2019. v. 11, n. 2, 2019. ISSN 2071-1050. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/11/2/384>>. Citado na página 26.
- CASSARRO, A. C. *Sistemas de informações para tomada de decisões*. [S.l.]: Cengage Learning, 2023. Citado na página 17.
- CHARU, C. A. *Neural networks and deep learning: a textbook*. [S.l.]: Springer, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 20.
- CHOI, S. H. et al. An integrated mixed reality system for safety-aware human-robot collaboration using deep learning and digital twin generation. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2022. Elsevier, v. 73, p. 102258, 2022. Citado na página 23.
- CID, A. et al. A simulated environment for the development and validation of an inspection robot for confined spaces. In: IEEE. *2020 Latin American Robotics Symposium (LARS), 2020 Brazilian Symposium on Robotics (SBR) and 2020 Workshop on Robotics in Education (WRE)*. [S.l.], 2020. p. 1–6. Citado na página 36.
- CONTADOR, J. C. et al. Flexibility in the brazilian industry 4.0: Challenges and opportunities. *Global Journal of Flexible Systems Management*, 2020. Springer, v. 21, n. Suppl 1, p. 15–31, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.
- DAVENPORT, T. *Big data at work: dispelling the myths, uncovering the opportunities*. [S.l.]: Harvard Business Review Press, 2014. Citado na página 17.
- DIAS, A. R. L. *Mineração 4.0: a evolução e os benefícios da indústria 4.0 no setor de mineração*. 2023. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2023. Citado na página 31.
- DIEESE. *Trabalho e reestruturação produtiva: 10 anos de Linha de Produção*. [S.l.]: Departamento Intersindical de Estatística and Estudos Sócio-Econômicos do Brasil, 1994. Citado na página 16.
- EDUCAÇÃO, M. *A robotização na produção industrial*. 2023. Disponível em: <<https://mundoeducacao.uol.com.br/geografia/a-robotizacao-na-producao-industrial.htm>>. Citado na página 24.
- FRANK, A. G.; DALENOGARE, L. S.; AYALA, N. F. Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies. *International journal of production economics*, 2019. Elsevier, v. 210, p. 15–26, 2019. Citado na página 24.
- FULLERTON, R. R.; KENNEDY, F. A.; WIDENER, S. K. Lean manufacturing and firm performance: The incremental contribution of lean management accounting practices. *Journal of Operations Management*, 2014. Elsevier, v. 32, n. 7-8, p. 414–428, 2014. Citado na página 17.
- FUTURETRANSPORT. *Por dentro da fábrica 4.0 da Volkswagen*. 2017. Disponível em: <<https://futuretransport.com.br/por-dentro-da-fabrica-4-0-da-volkswagen-em-sao-bernardo-do-campo/>>. Citado na página 34.

GILLESPIE, T. A relevância dos algoritmos. *Parágrafo*, 2018. v. 6, n. 1, p. 95–121, 2018. Citado na página 10.

GOODFELLOW, I.; BENGIO, Y.; COURVILLE, A. *Deep learning*. [S.l.]: MIT press, 2016. Citado na página 20.

HORVÁTH, D.; SZABÓ, R. Z. 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. Elsevier, v. 146, p. 119–132, 2019. Citado na página 25.

HORVÁTH, D.; SZABÓ, R. Z. 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. v. 146, p. 119–132, 2019. ISSN 0040-1625. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040162518315737>>. Citado na página 26.

IBM. *Industry 4.0 brings opportunities to infuse AI into manufacturing*. 2020. Disponível em: <<https://www.ibm.com/blogs/internet-of-things/iot-manufacturing-ready/>>. Citado na página 16.

INDUSTRIA, A. V. D. *Robótica Industrial: principais aplicações e vantagens*. 2019. Disponível em: <<https://avozdaindustria.com.br/inovacao/robotica-industrial-principais-aplicacoes-e-vantagens>>. Citado na página 24.

INDUSTRIAL, A. *O Ensino da Indústria 4.0*. 2016. Disponível em: <<https://www-automacaoindustrial.info/o-ensino-da-industria-4-0>>. Citado na página 18.

INDÚSTRIA, P. D. *Quais são as principais tecnologias da Indústria 4.0?* 2022. Disponível em: <<https://www.portaldaindustria.com.br/industria-de-a-z/industria-4-0/>>. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 14.

INFOESCOLA. *Indústria automotiva no Brasil*. 2023. Disponível em: <<https://www.infoescola.com/economia/industria-automotiva-no-brasil/>>. Citado na página 26.

KOROHODOVA, O.; PETRENKO, K. Instrumentation companies in industry 4.0. 2021. . . , 2021. Citado na página 22.

LEÃO, A. P. da S. et al. Power bi para tomada de decisões estratégicas: Análise de indicadores-chave de desempenho (kpis). *REVISTA FOCO*, 2023. v. 16, n. 7, p. e2472–e2472, 2023. Citado na página 31.

LOPES, M. V. R. Tratamento de imprecisão na geração de árvores de decisão. 2016. Universidade Federal de São Carlos, 2016. Citado na página 19.

LUDERMIR, T. B. Inteligência artificial e aprendizado de máquina: estado atual e tendências. *Estudos Avançados*, 2021. SciELO Brasil, v. 35, p. 85–94, 2021. Citado na página 20.

MARTINS, M. S.; PAULA, G. M. d.; BOTELHO, M. d. R. A. Inovações tecnológicas e indústria 4.0 na siderurgia: difusão, estrutura de mercado e heterogeneidade intrassetorial. 2021. v. 20, p. e021006, jul. 2021. Disponível em: <<https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/rbi/article/view/8660896>>. Citado na página 29.

MENDES, C. R.; SIEMON, F. B.; CAMPOS, M. M. d. Estudos de caso da indústria 4.0 aplicados em uma empresa automobilística. *POSGERE. São Paulo*, 2017. v. 1, p. 15–25, 2017. Citado na página 34.

MIŚKIEWICZ, R.; WOLNIAK, R. Practical application of the industry 4.0 concept in a steel company. *Sustainability*, 2020. v. 12, n. 14, 2020. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/12/14/5776>>. Citado na página 34.

NEO: Núcleo de Engenharia Organizacional. *Industry 4.0 Technology Mapping*. 2018. Available online. Disponível em: <<https://www.ufrgs.br/neo/industria40/>>. Citado na página 28.

ORACLE. *O que é Deep Learning*. 2016. Disponível em: <<https://www.oracle.com/br/artificial-intelligence/machine-learning/what-is-deep-learning/>>. Citado na página 19.

PEREZ, R. Algoritmo backpropagation. *Programar*, 2017. v. 57, julho 2017. Citado na página 18.

PINHO, M. S. Reestruturação produtiva e inserção internacional da siderurgia brasileira. *unpublished doctoral dissertation, Instituto de Economia, Unicamp, Campinas*, 2001. 2001. Citado na página 29.

PRICEWATERHOUSECOOPERS, P. *2016 Global Industry 4.0 Survey*. 2016. Disponível em: <<https://www.pwc.com/gx/en/industries/industries-4.0/landing-page/industry-4.0-building-your-digital-enterprise-april-2016.pdf>>. Citado na página 33.

QUEZADA, L. E. et al. Operational excellence towards sustainable development goals through industry 4.0. *International Journal of Production Economics*, 2017. v. 190, p. 1–2, 2017. ISSN 0925-5273. Operational Excellence towards Sustainable Development Goals through Industry 4.0. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527317301767>>. Citado na página 24.

RAJ, A. et al. Barriers to the adoption of industry 4.0 technologies in the manufacturing sector: An inter-country comparative perspective. *International Journal of Production Economics*, 2020. Elsevier, v. 224, p. 107546, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.

RELATÓRIO. *Relatório de produção e vendas da Vale no 4T23 e 2023*. 2024. Empresa VALE SA. Disponível em: <<https://vale.com/pt/relatorio-de-vendas-e-producao-4t23>>. Citado na página 35.

RODAS, R. Q. *A evolução das linhas de montagem de automóveis ao longo do século*. 2021. Disponível em: <<https://quatorrodas.abril.com.br/noticias/a-evolucao-das-linhas-de-montagem-de-automoveis/>>. Citado na página 26.

RUGGERO, S. M. et al. Investments of the automotive sector and the industry 4.0. brazilian case. In: SPRINGER. *IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems*. [S.l.], 2019. p. 650–657. Citado na página 27.

SATHLER, M. S. Mapeamento automatizado de gases com robôs. 2023. 2023. Citado na página 36.

SHOW, K. et al. Biohydrogen production: current perspectives and the way forward. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012. Elsevier, v. 37, n. 20, p. 15616–15631, 2012. Citado na página 20.

TGPOLI. *História e evolução da indústria automotiva brasileira*. 2019. Disponível em: <<https://www.tgpoli.com.br/noticias/historia-e-evolucao-da-industria-automotiva-brasileira/>>. Citado na página 26.

TOLETTINI, L.; LEHMANN, C. Industry 4.0: New paradigms of value creation for the steel sector. *Knowledge Management and Industry 4.0: New Paradigms for Value Creation*, 2020. Springer, p. 179–206, 2020. Citado na página 30.

XU, L. D.; XU, E. L.; LI, L. Industry 4.0: state of the art and future trends. *International journal of production research*, 2018. Taylor & Francis, v. 56, n. 8, p. 2941–2962, 2018. Citado na página 24.