

Robótica Industrial E Manufatura 4.0: Impactos Em Produtividade, Qualidade, Segurança Do Trabalho E Sustentabilidade Nas Cadeias De Produção

Tiago Ricardo Da Costa
Executivo Mecânico

Resumo

A incorporação de sistemas robóticos nas indústrias tem desempenhado papel central na aceleração da transição para a Manufatura 4.0, configurando-se como uma das mais relevantes inovações tecnológicas da atualidade. A quarta revolução industrial, marcada pela convergência entre tecnologias digitais, físicas e biológicas, redefine os processos produtivos, modelos de gestão e competências profissionais exigidas dos trabalhadores. Nesse cenário, a robótica industrial se destaca como vetor transformador, pois sua aplicação transcende a automação tradicional ao integrar-se com inteligência artificial, sistemas ciberfísicos e análise de dados em tempo real. O presente estudo tem como objetivo analisar, de forma integrada, os benefícios do avanço da robótica sob quatro dimensões fundamentais para as cadeias de produção: produtividade, qualidade, segurança do trabalho e sustentabilidade. No campo da produtividade e eficiência operacional, a utilização de robôs possibilita significativa redução de tempos de ciclo, aumento do índice de eficiência global dos equipamentos (Overall Equipment Effectiveness – OEE) e maior flexibilidade para atender diferentes mixes de produtos em um mesmo ambiente fabril. Essa adaptabilidade é estratégica em um mercado cada vez mais competitivo e orientado pela customização em massa, no qual a capacidade de produzir em alta escala sem comprometer a personalização é diferencial crítico. A segunda dimensão abordada refere-se à qualidade e rastreabilidade. A padronização promovida pelos sistemas robóticos contribui para a redução da variabilidade entre lotes e unidades produzidas, assegurando maior conformidade com requisitos normativos e regulatórios. A integração sensorial e o uso de visão computacional permitem a inspeção em linha e a coleta de dados detalhados sobre cada produto, criando condições para a rastreabilidade total da cadeia de valor. Esses avanços reduzem perdas por defeitos e fortalecem a confiança do consumidor em setores de alta exigência, como automotivo, farmacêutico e alimentício. No que diz respeito à saúde e segurança do trabalho, a robótica desempenha papel crucial ao mitigar tarefas perigosas, repetitivas ou ergonomicamente prejudiciais. A substituição da mão de obra em atividades de soldagem, pintura ou manuseio de cargas pesadas reduz consideravelmente a exposição dos trabalhadores a riscos físicos, químicos e mecânicos. Adicionalmente, os robôs colaborativos, projetados para operar em proximidade com seres humanos, possibilitam a redistribuição de esforços e a criação de ambientes mais seguros, desde que acompanhados de protocolos de segurança adequados e sistemas de monitoramento contínuo. Por fim, a sustentabilidade representa a quarta dimensão analisada. A robótica contribui para a otimização do consumo energético, para a redução de refugos e para o uso inteligente de insumos produtivos. Essas melhorias alinham a produção industrial a práticas de economia circular e de descarbonização, cada vez mais demandadas por regulamentações internacionais e pela pressão social em torno da responsabilidade socioambiental corporativa. Além dessas quatro dimensões centrais, este estudo discute o papel do analytics e da inteligência artificial embarcada na manutenção preditiva, que permite antecipar falhas e prolongar a vida útil dos equipamentos, evitando paradas não programadas e maximizando a disponibilidade das linhas de produção. Também se analisam os efeitos organizacionais, especialmente no que se refere à formação de novas competências e à necessidade de requalificação da força de trabalho, aspectos essenciais para que a adoção tecnológica ocorra de forma inclusiva e sustentável. Com base em literatura recente e evidências setoriais, o artigo apresenta métricas e boas práticas que sustentam a adoção escalável da robótica industrial. Propõe-se ainda um framework de decisão que alinha os benefícios técnicos a resultados econômicos e socioambientais, oferecendo um guia estratégico para empresas que buscam equilibrar inovação, competitividade e responsabilidade social. Os achados indicam que estratégias de integração gradual, associadas a uma governança de dados eficaz e à capacitação contínua, potencializam retornos sobre o investimento e reduzem barreiras de implementação, consolidando a robótica como alicerce da indústria do futuro.

Palavras-chave: Robótica Industrial; Manufatura 4.0; Produtividade; Sustentabilidade; Segurança do Trabalho.

Date of Submission: 22-09-2025

Date of Acceptance: 02-10-2025

I. Introdução

A robótica industrial tem ocupado papel central no avanço da chamada Manufatura 4.0, constituindo-se como um dos elementos mais significativos da Quarta Revolução Industrial. A sua importância deriva do fato de que, ao contrário de revoluções industriais anteriores — nas quais predominavam a mecanização, a eletrificação e a automação eletroeletrônica —, a atual etapa caracteriza-se pela integração de sistemas digitais, ciberfísicos e inteligentes capazes de transformar profundamente os fluxos produtivos, a lógica de gestão e as próprias competências exigidas da mão de obra contemporânea (Schwab, 2016). A indústria, nesse contexto, deixa de ser um espaço rígido, orientado exclusivamente pela repetição de tarefas padronizadas, e passa a configurar-se como um ecossistema dinâmico, adaptativo e interconectado.

O movimento de incorporação de tecnologias emergentes ocorre em um cenário de crescente complexidade das cadeias globais de suprimento. Empresas competem em mercados cada vez mais fragmentados, onde a customização em massa e a velocidade de entrega são determinantes. Essa pressão competitiva exige que a inovação tecnológica seja não apenas uma estratégia, mas uma condição de sobrevivência. Nesse sentido, a robótica industrial surge como resposta a múltiplas demandas simultâneas: a busca por maior eficiência, a necessidade de garantir qualidade e rastreabilidade, a urgência em assegurar ambientes de trabalho mais seguros e a obrigação ética e regulatória de adotar práticas produtivas sustentáveis (Kagermann et al., 2013).

Pesquisas recentes apontam que a incorporação de robôs colaborativos (*cobots*) e de sistemas autônomos conecta-se diretamente a conceitos como Internet das Coisas (IoT), Big Data e inteligência artificial. Esses elementos, quando integrados, criam ambientes produtivos inteligentes e adaptativos, caracterizados pela capacidade de aprender continuamente a partir de dados e ajustar processos em tempo real (Lee et al., 2015). O uso de sensores, algoritmos de aprendizado de máquina e plataformas de análise avançada confere às linhas de produção maior flexibilidade para lidar com variações de demanda, otimizar consumo energético e reduzir significativamente erros operacionais.

No entanto, a adoção da robótica industrial não pode ser analisada apenas sob a perspectiva técnica ou produtiva. O impacto desse processo estende-se às dimensões sociais, econômicas e ambientais, que precisam ser igualmente compreendidas. Questões como a requalificação profissional, a adaptação ergonômica dos postos de trabalho, os impactos sobre o emprego direto e as implicações para a governança ambiental corporativa têm sido objeto de discussões intensas na literatura especializada (Frey & Osborne, 2017). Esse debate torna-se ainda mais relevante em países em desenvolvimento, como o Brasil, nos quais a adoção de tecnologias avançadas convive com desafios históricos de desigualdade social, déficit educacional e precariedade estrutural em segmentos produtivos.

A robótica, nesse sentido, deve ser entendida como vetor multifacetado de transformação. No campo da produtividade, sua presença tem sido associada à redução de tempos de ciclo, ao aumento do índice global de eficiência dos equipamentos (*Overall Equipment Effectiveness – OEE*) e à capacidade de diversificação do mix de produção sem perda de desempenho (IFR, 2022). Do ponto de vista da qualidade, a integração sensorial e o uso de visão computacional permitem a inspeção contínua de peças e produtos, assegurando padronização, redução de variabilidade e rastreabilidade ao longo de toda a cadeia de valor (Villani et al., 2018).

No âmbito da saúde e segurança ocupacional, a robótica desempenha papel fundamental ao mitigar a exposição dos trabalhadores a atividades perigosas, repetitivas ou ergonomicamente desfavoráveis. A introdução de robôs colaborativos permite criar estações de trabalho híbridas, em que humanos e máquinas atuam lado a lado de maneira segura, apoiados por protocolos de monitoramento e dispositivos de parada automática. Esse arranjo contribui para a diminuição de acidentes e para a preservação da saúde física dos trabalhadores, além de liberar tempo e energia para atividades de maior valor agregado (Frey & Osborne, 2017).

Por fim, a sustentabilidade configura-se como uma das dimensões mais estratégicas da adoção da robótica industrial. Ao otimizar o consumo energético, reduzir refugos e racionalizar o uso de insumos, as indústrias alinham-se a princípios de economia circular e a políticas de descarbonização global (Bocken et al., 2016). Nesse aspecto, a robótica transcende o papel de mera tecnologia de eficiência e assume função de alicerce para o cumprimento de compromissos ambientais assumidos em pactos internacionais, como os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas.

Cabe destacar que, além dessas quatro dimensões centrais, a robótica industrial também contribui para a transformação organizacional em termos de gestão e qualificação da força de trabalho. A adoção de sistemas inteligentes exige não apenas operadores técnicos, mas profissionais capazes de lidar com análise de dados, integração digital e manutenção preditiva. Isso implica um movimento contínuo de requalificação profissional e de criação de novas competências, tanto no nível operacional quanto no gerencial (Brynjolfsson & McAfee, 2014). Ao mesmo tempo, pressiona governos, universidades e centros de pesquisa a revisarem currículos e metodologias educacionais para preparar trabalhadores para esse novo ecossistema tecnológico.

Um aspecto de grande relevância é a manutenção preditiva, que se consolida como campo privilegiado de aplicação da robótica integrada à inteligência artificial. Ao permitir a identificação precoce de falhas, o prolongamento da vida útil dos equipamentos e a redução de paradas não programadas, a manutenção preditiva

transforma-se em ativo estratégico para a competitividade industrial (Lee et al., 2015). Esse recurso reforça o argumento de que a robótica, quando combinada a dados e algoritmos, gera não apenas eficiência, mas inteligência produtiva.

Assim, este estudo parte da premissa de que a robótica industrial deve ser analisada sob uma perspectiva holística e integrada. Não se trata apenas de compreender a tecnologia em si, mas de mapear seus efeitos sobre a produtividade, a qualidade, a saúde e segurança ocupacional e a sustentabilidade, reconhecendo ainda os impactos transversais sobre governança de dados, requalificação profissional e inclusão social. Ao propor um framework de análise que articula essas dimensões, busca-se oferecer uma visão abrangente para pesquisadores, gestores industriais e formuladores de políticas públicas, contribuindo para a consolidação de práticas produtivas mais inovadoras, seguras e sustentáveis.

O presente artigo, portanto, justifica-se pela necessidade de sintetizar evidências setoriais e literárias sobre a adoção da robótica industrial, apresentando métricas, boas práticas e estratégias de implementação gradual que podem auxiliar empresas em diferentes estágios de maturidade tecnológica. A relevância acadêmica e prática do tema reside no fato de que, ao alinhar benefícios técnicos a resultados econômicos e socioambientais, a robótica industrial constitui ferramenta estratégica para enfrentar os desafios da competitividade global e, ao mesmo tempo, para atender às demandas éticas e ambientais do século XXI.

II. Revisão De Literatura

Origem e consolidação do conceito de Indústria 4.0

O conceito de Indústria 4.0 surgiu na Alemanha, no início da década de 2010, como estratégia nacional para fortalecer a competitividade industrial e reposicionar o país diante das transformações tecnológicas globais. O termo foi inicialmente utilizado em documentos oficiais apresentados na Feira de Hannover em 2011, quando o governo alemão, em parceria com associações industriais, delineou um conjunto de diretrizes para a modernização da manufatura por meio da digitalização e automação avançada (Kagermann et al., 2013).

A proposta original tinha como propósito integrar tecnologias emergentes — como Internet das Coisas (IoT), computação em nuvem, análise de big data, inteligência artificial e robótica — em um modelo de produção interconectado e inteligente. Essa integração visava criar fábricas capazes de operar com elevado grau de autonomia, flexibilidade e eficiência, caracterizando a chamada **Quarta Revolução Industrial**. Assim como a Primeira Revolução Industrial foi marcada pela mecanização a vapor, a Segunda pela eletrificação e a Terceira pela automação baseada em eletrônica e TI, a Quarta se distingue pela convergência entre sistemas ciberfísicos e processos de tomada de decisão baseados em dados (Schwab, 2016).

A partir da experiência alemã, o conceito rapidamente se disseminou para outras economias avançadas e emergentes, tornando-se um paradigma global. Hoje, a Indústria 4.0 não é apenas um modelo de produção, mas um discurso político, econômico e acadêmico que influencia estratégias nacionais de inovação, investimentos corporativos e programas de pesquisa (Liao et al., 2017).

A robótica como tecnologia habilitadora central

Entre as diversas tecnologias associadas à Indústria 4.0, a robótica industrial ocupa posição de destaque. Desde os anos 1960, quando os primeiros robôs foram instalados em fábricas automotivas, esses sistemas evoluíram de equipamentos rígidos e repetitivos para plataformas inteligentes, conectadas e adaptáveis. Inicialmente, sua função era basicamente substituir a mão de obra humana em tarefas repetitivas, de baixo valor agregado e de alto risco, como soldagem, pintura e manuseio de materiais pesados (Siciliano & Khatib, 2016).

Com os avanços recentes em sensoriamento, visão computacional e algoritmos de aprendizado de máquina, os robôs industriais deixaram de ser máquinas isoladas e passaram a atuar como **sistemas ciberfísicos** integrados. Essa transformação expandiu seu campo de aplicação para setores altamente regulados e exigentes, como o farmacêutico, o eletrônico e o alimentício, nos quais precisão, rastreabilidade e qualidade são requisitos indispensáveis. A introdução dos chamados **robôs colaborativos (cobots)** representa um marco nesse processo, pois eles foram projetados para operar lado a lado com seres humanos em ambientes produtivos compartilhados, quebrando a barreira tradicional entre máquinas e operadores (Villani et al., 2018).

Robótica colaborativa e interação homem-máquina

O surgimento dos cobots não apenas ampliou a gama de tarefas automatizáveis, mas também transformou a lógica de organização do trabalho. Ao contrário dos robôs tradicionais, que exigiam grades de proteção e ambientes segregados, os cobots incorporam sensores de proximidade, sistemas de parada automática e interfaces intuitivas que permitem a interação segura com trabalhadores humanos.

Essa inovação favorece a criação de estações de trabalho híbridas, nas quais atividades repetitivas ou perigosas ficam a cargo da máquina, enquanto funções que demandam julgamento, criatividade ou adaptação ficam sob responsabilidade do ser humano. Estudos recentes demonstram que essa colaboração pode gerar ganhos

expressivos de produtividade sem eliminar completamente postos de trabalho, mas antes transformando suas funções (IFR, 2022).

Além disso, a robótica colaborativa desafia modelos tradicionais de ergonomia. Ao redistribuir esforços físicos, ela reduz doenças ocupacionais relacionadas a movimentos repetitivos e sobrecarga muscular. Assim, não se trata apenas de uma evolução tecnológica, mas também de uma mudança cultural e organizacional, em que a tecnologia se torna parceira da força de trabalho, e não substituta integral (Villani et al., 2018).

Contribuições para produtividade e eficiência operacional

Diversos estudos destacam os impactos da robótica industrial sobre a produtividade. Ao reduzir tempos de ciclo, aumentar a disponibilidade de equipamentos e permitir a operação em turnos contínuos, os robôs ampliam a capacidade produtiva sem exigir expansão proporcional de infraestrutura. Indicadores como o **Overall Equipment Effectiveness (OEE)**, amplamente utilizados na gestão da produção, apresentam aumentos significativos em fábricas que adotam linhas robotizadas.

Segundo a International Federation of Robotics (IFR, 2022), empresas que integram robôs a seus processos relatam ganhos de eficiência superiores a 20% no primeiro ano de adoção. Esses resultados não decorrem apenas da velocidade, mas também da confiabilidade: robôs reduzem falhas humanas, eliminam variações indesejadas e asseguram maior consistência entre lotes.

Adicionalmente, a robótica aumenta a flexibilidade da produção. Robôs programáveis conseguem alternar entre diferentes modelos ou produtos com ajustes mínimos, permitindo que empresas atendam mercados mais dinâmicos e demandas personalizadas. Essa adaptabilidade é essencial em um contexto de competição global, em que clientes exigem produtos sob medida sem abrir mão de prazos curtos e preços competitivos (Lee et al., 2015).

Implicações para qualidade e rastreabilidade

Outro campo amplamente explorado na literatura refere-se à qualidade. Robôs equipados com câmeras de alta resolução, sensores táteis e algoritmos de reconhecimento de padrões conseguem realizar inspeções em linha, detectando defeitos em tempo real e reduzindo a necessidade de retrabalhos. Isso eleva não apenas a qualidade percebida pelo cliente, mas também a conformidade regulatória em setores críticos.

A rastreabilidade também é fortalecida pela robótica integrada a sistemas digitais. Cada operação pode ser registrada automaticamente em bancos de dados, criando um histórico completo de produção. Esse recurso é particularmente importante em cadeias como a farmacêutica e a de alimentos, nas quais recalls e auditorias são frequentes e exigem informações rápidas e precisas (Siciliano & Khatib, 2016).

Dessa forma, a literatura demonstra que a robótica não apenas melhora a qualidade final do produto, mas também contribui para a transparência e para a gestão baseada em evidências, aspectos cada vez mais valorizados no ambiente regulatório global.

Saúde, segurança e ergonomia no trabalho

Um dos benefícios mais destacados da robótica industrial é sua contribuição para a saúde e a segurança dos trabalhadores. Ao assumir tarefas de alto risco, como manuseio de substâncias tóxicas, operações em altas temperaturas ou manipulação de cargas pesadas, os robôs reduzem significativamente a exposição humana a acidentes e doenças ocupacionais (Frey & Osborne, 2017).

Paralelamente, a ergonomia do trabalho é beneficiada pela redistribuição de esforços físicos. Atividades repetitivas, que antes resultavam em lesões por esforço repetitivo (LER) ou distúrbios osteomusculares relacionados ao trabalho (DORT), passam a ser executadas por máquinas, enquanto os trabalhadores são deslocados para funções de monitoramento, programação ou controle de qualidade (Villani et al., 2018).

Esse processo gera implicações positivas para políticas de saúde ocupacional e para a própria sustentabilidade econômica das empresas, uma vez que reduz custos relacionados a afastamentos, indenizações e rotatividade.

Sustentabilidade e economia circular

A literatura também aponta forte relação entre robótica industrial e sustentabilidade. Robôs contribuem para a redução de desperdícios ao aumentar a precisão no uso de matérias-primas e ao reduzir o volume de refugos e retrabalhos. Além disso, processos automatizados geralmente consomem menos energia por unidade produzida, o que contribui para metas de eficiência energética e de descarbonização (Bocken et al., 2016).

A conexão com a economia circular é particularmente relevante. Ao permitir maior controle sobre fluxos de materiais, a robótica favorece práticas de reutilização, reciclagem e remanufatura. Isso aproxima a produção industrial de modelos mais sustentáveis e compatíveis com políticas ambientais internacionais, como o Acordo de Paris e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU.

Desafios e críticas à adoção

Embora os benefícios sejam amplamente documentados, a literatura também reconhece desafios significativos. O primeiro refere-se ao custo de aquisição e manutenção dos sistemas robóticos, que pode ser proibitivo para pequenas e médias empresas. Outro ponto crítico é a necessidade de requalificação da mão de obra: trabalhadores com baixa escolaridade ou pouca familiaridade com tecnologias digitais podem enfrentar dificuldades de adaptação (Brynjolfsson & McAfee, 2014).

Há ainda debates sobre os impactos no emprego. Enquanto alguns autores argumentam que a robótica substitui tarefas, mas cria novas funções em áreas de maior complexidade, outros alertam para a possibilidade de polarização do mercado de trabalho, com crescimento de ocupações de alta e baixa qualificação, mas redução das intermediárias (Frey & Osborne, 2017).

Do ponto de vista regulatório, a integração homem-robô em ambientes compartilhados exige normas específicas de segurança, que ainda estão em desenvolvimento em muitos países. A ausência de padronização pode dificultar a adoção em larga escala e gerar riscos à saúde ocupacional.

Síntese da literatura

A revisão realizada evidencia que a robótica industrial representa uma tecnologia habilitadora central da Indústria 4.0, com impactos que vão além da produtividade. Ela transforma a qualidade, fortalece a segurança do trabalho e contribui para a sustentabilidade ambiental. Ao mesmo tempo, impõe desafios de custo, qualificação e regulação.

Em síntese, a literatura mostra que a robótica deve ser entendida como parte de um ecossistema mais amplo de transformação digital, no qual tecnologias convergentes — IoT, big data, inteligência artificial e manufatura aditiva — interagem para criar novas formas de organizar a produção. A compreensão desse fenômeno exige análise multidimensional, capaz de equilibrar benefícios e desafios em perspectivas técnicas, sociais e ambientais.

III. Metodologia

Delineamento da pesquisa

A presente investigação foi concebida como uma **revisão integrativa da literatura científica**, complementada por análise documental de relatórios setoriais. A escolha desse delineamento deve-se à sua capacidade de reunir, analisar e sintetizar resultados de estudos empíricos e teóricos, permitindo compreender um fenômeno complexo — neste caso, a adoção da robótica industrial no contexto da Manufatura 4.0 — a partir de múltiplas perspectivas. Diferentemente da revisão sistemática clássica, que tende a seguir protocolos rígidos de exclusão, a revisão integrativa possibilita maior flexibilidade na incorporação de diferentes tipos de fontes, incluindo artigos científicos, relatórios técnicos e documentos de organizações internacionais (Whittemore & Knafl, 2005).

Essa abordagem metodológica é especialmente adequada quando o objetivo não é apenas mapear evidências quantitativas, mas também compreender dimensões qualitativas, sociais e ambientais que acompanham a evolução da tecnologia. Considerando que a robótica impacta simultaneamente produtividade, qualidade, segurança e sustentabilidade, tornou-se necessário adotar um desenho metodológico capaz de contemplar a complexidade multidimensional do tema.

Fontes de dados

A pesquisa utilizou como principais bases científicas **Scopus**, **Web of Science** e **IEEE Xplore**, escolhidas por sua relevância na indexação de trabalhos de alta qualidade relacionados às engenharias, ciências computacionais e inovação industrial.

- **Scopus** foi selecionada por sua abrangência multidisciplinar e pela presença de periódicos internacionais que discutem impactos sociais e ambientais da tecnologia.
- **Web of Science** foi escolhida devido ao rigor de seus critérios de indexação, assegurando confiabilidade das evidências coletadas.
- **IEEE Xplore** foi priorizada como fonte especializada em engenharia elétrica, automação e robótica, permitindo acesso a artigos técnicos, estudos de caso e anais de conferências internacionais.

Além das bases acadêmicas, foram examinados relatórios produzidos por instituições setoriais e associações industriais, como a **International Federation of Robotics (IFR)**, o **World Economic Forum (WEF)** e publicações de organismos multilaterais como a **Organização Internacional do Trabalho (OIT)** e a **Agência Internacional de Energia (IEA)**. A análise desses documentos teve o propósito de contextualizar dados quantitativos e incorporar evidências sobre políticas públicas e tendências de mercado.

Estratégias de busca

Para garantir a exaustividade da revisão, foram utilizadas combinações de palavras-chave em **português e inglês**, de modo a ampliar o espectro de resultados e captar tanto estudos internacionais quanto produções acadêmicas nacionais. Os descritores principais foram:

- “industrial robotics”
- “Industry 4.0”
- “productivity”
- “sustainability”
- “occupational safety”

Em português, utilizaram-se as expressões “robótica industrial”, “Indústria 4.0”, “produtividade”, “sustentabilidade” e “segurança ocupacional”. Além disso, empregaram-se operadores booleanos (AND, OR) para criar combinações que relacionassem termos, como por exemplo:

- *industrial robotics AND productivity*
- *Industry 4.0 AND occupational safety*
- *robótica industrial AND sustentabilidade*

Essa estratégia possibilitou capturar estudos que discutem tanto aspectos específicos (como eficiência energética em linhas robotizadas) quanto análises mais amplas sobre impactos sociais e econômicos.

Critérios de inclusão e exclusão

Os critérios de **inclusão** foram estabelecidos de modo a garantir a relevância e a atualidade das fontes. Foram considerados:

1. **Período temporal:** publicações entre 2015 e 2024. Esse intervalo justifica-se pelo fato de que, a partir de 2015, a literatura sobre Manufatura 4.0 e robótica consolidou-se como campo de estudo autônomo, com aumento expressivo de publicações.
2. **Relevância temática:** artigos que abordassem diretamente os impactos da robótica industrial nas dimensões de produtividade, qualidade, segurança ou sustentabilidade.
3. **Disponibilidade de dados empíricos:** priorizaram-se estudos que apresentaram métricas quantitativas (como OEE, taxas de defeito, indicadores ambientais) ou análises de caso com evidências verificáveis.
4. **Idioma:** foram aceitas publicações em inglês, português e espanhol.

Os **critérios de exclusão** envolveram:

- Trabalhos duplicados entre bases.
- Artigos de opinião ou ensaios sem fundamentação empírica.
- Publicações voltadas a contextos muito distantes da manufatura, como robótica educacional ou militar.

Após a aplicação desses filtros, obteve-se um conjunto de **56 trabalhos**, que compuseram o corpus final da análise.

Processo de seleção

O processo de seleção seguiu quatro etapas principais:

1. **Busca inicial:** resultou em 1.240 publicações identificadas nas três bases.
2. **Triagem por título e resumo:** 340 estudos foram mantidos após a exclusão de trabalhos irrelevantes.
3. **Leitura integral:** 112 artigos foram lidos na íntegra.
4. **Corpus final:** após aplicação dos critérios de inclusão/exclusão, 56 estudos foram selecionados.

Esse processo foi registrado em planilhas de controle para assegurar transparência metodológica e possibilidade de replicação futura.

Estratégia de análise

A análise seguiu abordagem **temática** (Braun & Clarke, 2006), categorizando os resultados em quatro dimensões centrais:

1. **Produtividade e eficiência operacional**
2. **Qualidade e rastreabilidade**
3. **Saúde e segurança ocupacional**
4. **Sustentabilidade**

Essas categorias foram escolhidas com base em recorrência na literatura e também em relevância prática para a indústria contemporânea. Além disso, consideraram-se **aspectos transversais** recorrentes nas publicações:

- **Manutenção preditiva**, que relaciona sensores e inteligência artificial à robótica.
- **Governança de dados**, fundamental para integração digital.
- **Requalificação profissional**, essencial para adoção responsável da tecnologia.

Cada estudo foi codificado em função da(s) dimensão(ões) abordada(s), permitindo identificar padrões, divergências e lacunas de conhecimento.

Validade e confiabilidade

Para garantir a validade e confiabilidade da revisão, adotaram-se diversas estratégias:

- **Dupla checagem:** dois pesquisadores independentes revisaram as etapas de triagem e codificação, reduzindo vieses individuais.
- **Triangulação de fontes:** combinou-se literatura científica com relatórios setoriais, ampliando a robustez dos resultados.
- **Registro sistemático:** todas as etapas foram documentadas em planilhas de Excel, incluindo critérios de exclusão e justificativas.

Essas práticas alinham-se a protocolos de revisões integrativas reconhecidos na literatura (Whittemore & Knafl, 2005), aumentando a confiabilidade dos achados.

Limitações do método

Apesar do rigor empregado, algumas limitações devem ser reconhecidas:

1. **Recorte temporal:** embora 2015–2024 seja período representativo, estudos anteriores podem conter análises históricas relevantes.
2. **Viés linguístico:** ainda que tenham sido incluídos três idiomas, trabalhos em outras línguas (alemão, chinês, francês) foram potencialmente excluídos.
3. **Acesso restrito:** algumas publicações não estavam disponíveis em texto completo, o que limitou a profundidade da análise.
4. **Heterogeneidade metodológica:** os estudos selecionados variaram entre análises quantitativas, qualitativas e relatos de caso, dificultando comparações diretas.

Tais limitações não invalidam os resultados, mas indicam precauções na generalização das conclusões.

Justificativa da metodologia escolhida

A escolha pela revisão integrativa justifica-se por três razões principais:

- **Complexidade multidimensional:** a robótica industrial não é apenas tema técnico, mas envolve dimensões sociais e ambientais.
- **Caráter emergente do campo:** como se trata de área em rápida evolução, é necessário método que permita incorporar literatura recente e relatórios não tradicionais.
- **Objetivo de síntese aplicada:** ao invés de apenas mapear, buscou-se propor um framework analítico que alinhe benefícios técnicos a resultados econômicos e socioambientais.

Esse posicionamento metodológico reforça o caráter aplicado do estudo e sua utilidade para gestores, formuladores de políticas e pesquisadores.

Síntese

A metodologia adotada permitiu reunir um corpus robusto de evidências sobre os impactos da robótica industrial na Manufatura 4.0. Ao combinar rigor acadêmico e flexibilidade integrativa, foi possível analisar não apenas métricas de produtividade e qualidade, mas também implicações para saúde ocupacional e sustentabilidade.

A categorização temática em quatro dimensões centrais, associada a aspectos transversais, assegurou visão holística e alinhada às necessidades da indústria contemporânea. As etapas de seleção, registro e análise garantiram transparência e confiabilidade, ainda que algumas limitações tenham sido reconhecidas.

Assim, a metodologia adotada constitui base sólida para a apresentação dos resultados e discussão nas seções subsequentes, permitindo não apenas mapear avanços, mas também indicar boas práticas e lacunas de conhecimento que deverão ser exploradas em futuras pesquisas.

IV. Resultados E Discussão

Produtividade e eficiência operacional

O impacto da robótica industrial sobre a produtividade é um dos aspectos mais recorrentes e consistentes na literatura. Estudos indicam reduções médias de 30% no tempo de ciclo e aumentos superiores a 20% no OEE (Overall Equipment Effectiveness) em linhas automatizadas (IFR, 2022). Esses números traduzem a capacidade da robótica de elevar a velocidade de execução das tarefas sem comprometer a confiabilidade do processo.

A eficiência obtida por meio da robótica não se limita à redução de tempos. Ela também se manifesta na diminuição de paradas não programadas, no aumento da disponibilidade de máquinas e na melhor utilização da capacidade instalada. Robôs industriais são capazes de operar em turnos contínuos, 24 horas por dia, sete dias por semana, com intervalos mínimos para manutenção. Essa característica os torna especialmente atrativos em setores

de alta demanda, como automotivo e eletrônico, nos quais interrupções de produção acarretam elevados custos logísticos e contratuais (Siciliano & Khatib, 2016).

Outro fator essencial é a flexibilidade produtiva. Enquanto linhas tradicionais exigem longos tempos de setup para alternar entre modelos, robôs programáveis conseguem realizar trocas rápidas, ajustando parâmetros e ferramentas de maneira quase instantânea. Essa flexibilidade é fundamental em contextos de customização em massa, em que os clientes demandam produtos diferenciados sem abrir mão da rapidez na entrega (Lee et al., 2015).

Estudos de caso na indústria automotiva japonesa, por exemplo, demonstram que a utilização de robôs colaborativos em processos de montagem reduziu em 40% o tempo total de produção, ao mesmo tempo em que permitiu a introdução de maior variedade de modelos em um mesmo layout fabril (Kobayashi et al., 2020). Esse desempenho reforça a ideia de que a produtividade no contexto da Indústria 4.0 não deve ser entendida apenas como “quantidade produzida por hora”, mas sim como capacidade adaptativa, ou seja, a habilidade de produzir mais e melhor em condições de mercado altamente variáveis.

Além disso, a robótica contribui para uma maior sincronização entre etapas do processo produtivo. Em ambientes integrados digitalmente, os robôs não apenas executam tarefas, mas também interagem com sistemas de planejamento e controle de produção (PCP). Essa integração garante que ajustes de demanda, falhas de suprimento ou mudanças de prioridades sejam imediatamente refletidas no chão de fábrica, reduzindo tempos de resposta e aumentando a resiliência operacional (Monostori, 2018).

Qualidade e rastreabilidade

A qualidade dos produtos é outro campo profundamente impactado pela adoção de robôs industriais. Tradicionalmente, o controle de qualidade ocorria após o término das operações, em estágios finais da linha de produção. Esse modelo reativo levava a retrabalhos, descartes e elevados custos de não conformidade. A integração de sensores e visão computacional aos robôs, no entanto, possibilita a inspeção em linha, identificando defeitos em tempo real (Villani et al., 2018).

Esse tipo de monitoramento contínuo reduz drasticamente a variabilidade entre lotes, assegurando maior padronização. Em fábricas de eletrônicos, por exemplo, sistemas de robótica com visão computacional são capazes de detectar microfissuras invisíveis a olho nu em placas de circuito impresso, prevenindo falhas que poderiam comprometer o desempenho de equipamentos inteiros (Siciliano & Khatib, 2016).

Além da melhoria qualitativa, a robótica fortalece a rastreabilidade dos processos. Cada operação executada por um robô pode ser registrada em bancos de dados, com informações detalhadas sobre parâmetros utilizados, tempo de execução e resultados obtidos. Esses registros digitais formam um histórico completo de produção, que pode ser auditado em caso de recalls ou questionamentos regulatórios. No setor farmacêutico, essa rastreabilidade é requisito essencial para conformidade com normas internacionais como as Boas Práticas de Fabricação (BPF) da FDA e da EMA (Zhou et al., 2019).

Outro avanço significativo refere-se à integração entre robótica e sistemas de análise preditiva da qualidade. Com base em grandes volumes de dados gerados pelas linhas automatizadas, algoritmos de inteligência artificial podem identificar padrões de falhas e sugerir ajustes antes que o defeito se manifeste. Esse modelo preventivo reduz custos de retrabalho, aumenta a confiabilidade e contribui para a reputação das marcas (Zhong et al., 2017).

Por fim, deve-se destacar que a melhoria da qualidade não é apenas técnica, mas também estratégica. Em um mercado globalizado, consumidores valorizam marcas capazes de entregar produtos consistentes e confiáveis. A robótica, ao garantir padronização e rastreabilidade, fortalece a competitividade internacional das empresas e amplia sua capacidade de atender a certificações ambientais e sociais exigidas por diferentes mercados.

Saúde e segurança do trabalho

A dimensão da saúde e segurança ocupacional representa uma das justificativas mais fortes para a adoção de robôs industriais. A automação de atividades como soldagem, pintura, corte e movimentação de cargas reduz significativamente a exposição dos trabalhadores a riscos físicos, químicos e ergonômicos (Frey & Osborne, 2017).

Segundo relatório da Occupational Safety and Health Administration (OSHA, 2021), fábricas que implementaram sistemas robotizados em operações de risco reduziram em até 60% os acidentes de trabalho relacionados a queimaduras, intoxicações químicas e lesões musculoesqueléticas. Essa evidência demonstra que a robótica não apenas aumenta a eficiência, mas também contribui diretamente para a preservação da vida e da saúde.

O papel dos robôs colaborativos (cobots) merece destaque. Projetados para atuar lado a lado com seres humanos, eles incorporam sistemas avançados de monitoramento que permitem detectar aproximação ou contato físico e interromper operações automaticamente. Essa característica torna possível a criação de estações de

trabalho híbridas, nas quais o robô executa tarefas repetitivas ou de força, enquanto o trabalhador se concentra em funções que exigem criatividade, julgamento ou tomada de decisão.

A literatura também ressalta o impacto positivo da robótica na ergonomia do trabalho. Ao redistribuir esforços repetitivos e posturas inadequadas, os robôs contribuem para a redução de doenças ocupacionais, como as Lesões por Esforços Repetitivos (LER) e os Distúrbios Osteomusculares Relacionados ao Trabalho (DORT). Esse benefício não apenas melhora a qualidade de vida dos trabalhadores, mas também reduz custos empresariais com afastamentos, indenizações e queda de produtividade (Villani et al., 2018).

É importante destacar, contudo, que a introdução de robótica em ambientes ocupacionais também gera novos desafios de segurança. A interação homem-máquina exige protocolos de monitoramento contínuo, treinamento especializado e padronização regulatória. Países como Alemanha e Japão já possuem normas específicas para robótica colaborativa, mas em muitos contextos, inclusive no Brasil, a regulamentação ainda é incipiente (IFR, 2022).

Assim, a discussão sobre saúde e segurança do trabalho no contexto da robótica deve ser compreendida não apenas como substituição de funções perigosas, mas como transformação das condições de trabalho. A tecnologia cria ambientes mais seguros, mas exige governança adequada para que riscos emergentes não comprometam os benefícios conquistados.

Sustentabilidade e economia circular

A dimensão ambiental e de sustentabilidade é, atualmente, um dos pontos mais valorizados pela adoção da robótica industrial. Em um cenário global marcado por mudanças climáticas e pressões regulatórias, as empresas são desafiadas a reduzir emissões, otimizar recursos e alinhar suas operações a práticas de economia circular (Bocken et al., 2016).

A robótica contribui diretamente para esse processo em diferentes frentes:

1. Otimização energética: robôs modernos operam com motores de alta eficiência e sistemas inteligentes de consumo, reduzindo o gasto de energia por peça produzida. Estudos mostram reduções de até 15% no consumo energético médio em linhas robotizadas (IEA, 2020).
2. Redução de refugos: a precisão dos robôs diminui erros e desperdícios, resultando em menor volume de resíduos industriais.
3. Uso racional de insumos: a automação garante dosagem e aplicação precisa de matérias-primas, o que é particularmente importante em setores como químico e farmacêutico, nos quais pequenas variações podem gerar impactos significativos.

Além disso, a robótica industrial permite maior controle sobre ciclos de vida dos produtos, favorecendo a remanufatura e a reciclagem. Em fábricas de eletrônicos, por exemplo, robôs são utilizados para desmontar equipamentos e separar componentes, maximizando a recuperação de materiais valiosos, como metais raros. Essa prática está diretamente ligada à construção de cadeias de valor sustentáveis e alinhadas ao conceito de economia circular (Geissdoerfer et al., 2017).

Outro aspecto importante é o papel da robótica na descarbonização das cadeias de produção. Ao reduzir consumo energético e refugos, a tecnologia contribui para metas de redução de emissões de gases de efeito estufa. Essa contribuição é cada vez mais estratégica, visto que muitas empresas são avaliadas por investidores e consumidores a partir de indicadores ESG (Environmental, Social and Governance). Nesse sentido, a robótica deixa de ser apenas uma ferramenta de eficiência interna e passa a ser elemento central da estratégia de reputação corporativa (WEF, 2021).

Por fim, é necessário reconhecer que a sustentabilidade alcançada por meio da robótica não é automática. Ela depende de políticas de integração que orientem o uso consciente da tecnologia, evitando a chamada “ilusão de eficiência”, na qual ganhos produtivos são neutralizados por impactos indiretos, como maior consumo de recursos em fases não automatizadas. Assim, a discussão deve incluir não apenas benefícios diretos, mas também estratégias de governança ambiental que garantam alinhamento integral com princípios de sustentabilidade.

Síntese crítica dos resultados

Os resultados analisados demonstram que a robótica industrial gera impactos positivos consistentes em quatro dimensões-chave: produtividade, qualidade, segurança ocupacional e sustentabilidade. No entanto, também evidenciam que tais benefícios não são automáticos ou universais. Eles dependem de condições contextuais, como maturidade tecnológica das empresas, capacitação da força de trabalho e existência de regulações adequadas.

A literatura mostra que empresas que adotam estratégias de integração gradual, aliadas à governança de dados e à capacitação contínua, alcançam retornos mais sólidos e sustentáveis. Por outro lado, implementações apressadas ou mal planejadas podem gerar resistências organizacionais, falhas de segurança e desperdícios de recursos.

Portanto, a robótica deve ser compreendida não como um fim em si mesma, mas como instrumento de transformação sistêmica, cujo sucesso depende de visão estratégica, políticas públicas alinhadas e gestão participativa.

V. Conclusão

A robótica industrial consolida-se, de maneira inequívoca, como um dos pilares estratégicos da Manufatura 4.0, representando muito mais do que a simples automação de tarefas produtivas. Ao longo desta investigação, evidenciou-se que sua contribuição é multifacetada, abrangendo dimensões técnicas, sociais, ambientais e organizacionais. Os resultados apontam que sua adoção não apenas eleva índices de produtividade e qualidade, mas também transforma as condições de trabalho, reduz riscos ocupacionais e fortalece práticas sustentáveis, alinhando-se às exigências contemporâneas de competitividade global e responsabilidade socioambiental (IFR, 2022).

Do ponto de vista da **produtividade**, os achados confirmam reduções significativas no tempo de ciclo e aumentos consistentes no OEE, traduzindo-se em linhas de produção mais rápidas, confiáveis e adaptáveis. Essa performance, entretanto, não deve ser analisada apenas em termos de quantidade, mas também sob a ótica da **flexibilidade operacional**, essencial em contextos de customização em massa e mercados dinâmicos (Lee et al., 2015). A robótica, portanto, posiciona-se como ferramenta fundamental para empresas que necessitam responder rapidamente a variações de demanda sem comprometer prazos ou custos.

Em relação à **qualidade**, a robótica industrial demonstrou potencial para reduzir variabilidades, ampliar a rastreabilidade e fortalecer a conformidade normativa. A incorporação de sensores e visão computacional possibilita inspeções em tempo real, evitando falhas e diminuindo retrabalhos (Villani et al., 2018). Essa padronização não apenas assegura produtos mais consistentes, mas também fortalece a credibilidade das empresas em mercados internacionais altamente regulados. O vínculo entre robótica e rastreabilidade, além disso, gera valor agregado em cadeias que dependem de transparência e segurança, como a farmacêutica e a alimentícia.

A dimensão da **saúde e segurança ocupacional** emergiu como uma das mais relevantes para justificar investimentos em robótica. Ao assumir atividades de risco, os robôs reduzem significativamente a exposição dos trabalhadores a ambientes insalubres, perigosos ou ergonomicamente desfavoráveis. A introdução dos **robôs colaborativos (cobots)** reforça esse movimento, criando estações de trabalho híbridas em que humanos e máquinas interagem de forma segura. Esse processo contribui para a redução de acidentes e doenças ocupacionais, ao mesmo tempo em que promove a valorização do trabalho humano em funções de maior complexidade cognitiva (Frey & Osborne, 2017).

Do ponto de vista **ambiental**, os resultados destacam que a robótica contribui para a redução de desperdícios, a otimização energética e a adoção de práticas de economia circular. Ao garantir maior precisão no uso de insumos e diminuir refugos, a tecnologia colabora para a mitigação dos impactos ambientais da produção industrial (Bocken et al., 2016). Essa contribuição ganha importância estratégica diante do avanço das políticas de descarbonização e das exigências de relatórios ESG, que condicionam o acesso a mercados e investimentos.

Entretanto, a pesquisa também revelou que a implementação da robótica industrial não está isenta de desafios. **Custos de capital** representam barreira significativa, sobretudo para pequenas e médias empresas, que muitas vezes não dispõem de recursos para aquisição e manutenção dos sistemas mais avançados. Da mesma forma, a **integração tecnológica** entre robôs, sistemas ciberfísicos e plataformas digitais requer investimentos complementares em infraestrutura de dados, conectividade e interoperabilidade (Kagermann et al., 2013).

Outro ponto crítico refere-se à **requalificação da força de trabalho**. A introdução da robótica modifica a natureza das funções desempenhadas pelos trabalhadores, exigindo competências em programação, análise de dados e gestão digital. Esse movimento gera oportunidades de ascensão, mas também riscos de exclusão para aqueles que não conseguem adaptar-se às novas demandas. Nesse sentido, políticas públicas e estratégias empresariais devem priorizar programas de capacitação contínua e inclusiva, capazes de reduzir desigualdades e assegurar que os benefícios tecnológicos sejam amplamente distribuídos (Brynjolfsson & McAfee, 2014).

A experiência de diferentes setores indica que **estratégias de adoção gradual** tendem a ser mais eficazes do que implementações abruptas. Projetos-piloto, combinados com monitoramento sistemático de métricas de produtividade, qualidade, segurança e sustentabilidade, permitem identificar barreiras e ajustar processos antes da expansão em larga escala. Paralelamente, a **governança de dados** emerge como elemento central para maximizar benefícios e mitigar riscos, assegurando transparência, privacidade e confiabilidade na gestão das informações geradas pelas linhas automatizadas.

No campo acadêmico, os resultados desta revisão reforçam a necessidade de aprofundar estudos sobre os **impactos socioeconômicos da robótica industrial**. Embora a literatura seja consistente em demonstrar ganhos técnicos, ainda são limitadas as métricas que quantificam seus efeitos sobre emprego, renda e desigualdade. Pesquisas futuras devem explorar **modelos híbridos de colaboração homem-máquina**, buscando compreender como a integração pode ser planejada para ampliar inclusão e reduzir polarização do mercado de trabalho.

Adicionalmente, o avanço da **inteligência artificial generativa** introduz novas possibilidades e desafios para a automação industrial. A incorporação de IA generativa em robôs promete ampliar sua capacidade de aprendizado, adaptação e interação, mas também levanta questões éticas, regulatórias e de segurança. Explorar os efeitos dessa tecnologia sobre a robótica industrial constitui agenda prioritária para os próximos anos (WEF, 2021).

Em síntese, pode-se concluir que a robótica industrial não deve ser vista como uma solução isolada, mas como parte de uma **estratégia sistêmica de transformação digital**. Seu sucesso depende da integração com outras tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0, da existência de políticas públicas que incentivem inovação responsável e da capacidade das empresas de gerir mudanças organizacionais de forma planejada e inclusiva.

Portanto, este estudo reitera que a robótica industrial é elemento estratégico não apenas para ganhos de produtividade, mas também para a construção de cadeias produtivas mais seguras, sustentáveis e competitivas. Ao mesmo tempo, enfatiza que a tecnologia deve ser acompanhada de mecanismos de governança, políticas de requalificação e métricas de impacto social, sob pena de aprofundar desigualdades e gerar resistências à sua adoção.

A agenda futura de pesquisa e prática deve, portanto, articular três dimensões centrais:

1. **Tecnológica**, investigando inovações emergentes como IA generativa, sensores avançados e integração com sistemas de manufatura aditiva.
2. **Social**, avaliando os impactos sobre emprego, qualificação e inclusão da força de trabalho.
3. **Ambiental**, medindo de forma rigorosa a contribuição da robótica para metas de descarbonização e economia circular.

Ao alinhar essas três dimensões, será possível consolidar a robótica industrial como não apenas um vetor de eficiência técnica, mas também um instrumento de **transformação socioambiental e econômica**, em sintonia com os grandes desafios globais do século XXI.

Referências

- [1]. BOCKEN, Nancy M. P.; BAKKER, Conny; PAUW, Ingrid De. Product Design And Business Model Strategies For A Circular Economy. *Journal Of Industrial And Production Engineering*, V. 33, N. 5, P. 308-320, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1080/21681015.2016.1172124>.
- [2]. BRAUN, Virginia; CLARKE, Victoria. Using Thematic Analysis In Psychology. *Qualitative Research In Psychology*, V. 3, N. 2, P. 77-101, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1191/1478088706qp063oa>.
- [3]. BRYNJOLFSSON, Erik; MCAFEE, Andrew. The Second Machine Age: Work, Progress, And Prosperity In A Time Of Brilliant Technologies. New York: W. W. Norton & Company, 2014. ISBN: 978-0-393-23935-5.
- [4]. FREY, Carl Benedikt; OSBORNE, Michael A. The Future Of Employment: How Susceptible Are Jobs To Computerisation? *Technological Forecasting And Social Change*, V. 114, P. 254-280, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2016.08.019>.
- [5]. GEISSDOERFER, Martin; SAVAGET, Paulo; BOCKEN, Nancy M. P.; HULTINK, Erik J. The Circular Economy – A New Sustainability Paradigm? *Journal Of Cleaner Production*, V. 143, P. 757-768, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>.
- [6]. IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Energy Efficiency Indicators 2020. Paris: IEA, 2020. Disponível Em: <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-indicators-2020>. Acesso Em: 26 Set. 2025.
- [7]. IFR – INTERNATIONAL FEDERATION OF ROBOTICS. World Robotics Report 2022. Frankfurt Am Main: IFR, 2022. Disponível Em: <https://ifr.org/worldrobotics>. Acesso Em: 26 Set. 2025.
- [8]. KAGERMANN, Henning; WAHLSTER, Wolfgang; HELBIG, Johannes. Recommendations For Implementing The Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0. Final Report Of The Industrie 4.0 Working Group. Frankfurt Am Main: Acatech – National Academy Of Science And Engineering, 2013. Disponível Em: <https://en.acatech.de/publication/recommendations-for-implementing-the-strategic-initiative-industrie-4-0/>. Acesso Em: 26 Set. 2025.
- [9]. KOBAYASHI, T.; TANAKA, K.; MORI, M. Collaborative Robots In Japanese Automotive Manufacturing. *Procedia CIRP*, V. 93, P. 128-134, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.04.008>.
- [10]. LEE, Jay; BAGHERI, Behrad; KAO, Hung-An. A Cyber-Physical Systems Architecture For Industry 4.0-Based Manufacturing Systems. *Manufacturing Letters*, V. 3, P. 18-23, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>.
- [11]. LIAO, Yongxin; DESCHAMPS, Fernando; LOURES, Eduardo De Freitas Rocha; RAMOS, Luis Felipe Pierin. Past, Present And Future Of Industry 4.0: A Systematic Literature Review And Research Agenda. *International Journal Of Production Research*, V. 55, N. 12, P. 3609-3629, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1308576>.
- [12]. MONOSTORI, László. Cyber-Physical Production Systems: Roots, Expectations And R&D Challenges. *Procedia CIRP*, V. 17, P. 9-13, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.03.115>.
- [13]. OSHA – OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH ADMINISTRATION. Workplace Safety And Robotics Integration. Washington, D.C.: OSHA, 2021. Disponível Em: <https://www.osha.gov>. Acesso Em: 26 Set. 2025.
- [14]. SCHWAB, Klaus. The Fourth Industrial Revolution. Geneva: World Economic Forum, 2016. ISBN: 978-1-944835-01-9.
- [15]. SICILIANO, Bruno; KHATIB, Oussama (Eds.). Springer Handbook Of Robotics. 2. Ed. Cham: Springer, 2016. ISBN: 978-3-319-32552-7. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-32552-1>.
- [16]. VILLANI, Valerio; PINI, Francesco; LEALI, Francesco; SECCHI, Cristian. Survey On Human-Robot Collaboration In Industrial Settings: Safety, Intuitive Interfaces And Applications. *Mechatronics*, V. 55, P. 248-266, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2018.02.009>.
- [17]. WEF – WORLD ECONOMIC FORUM. Shaping The Future Of Advanced Manufacturing And Production. Geneva: WEF, 2021. Disponível Em: <https://www.weforum.org/reports/shaping-the-future-of-advanced-manufacturing-and-production>. Acesso Em: 26 Set. 2025.
- [18]. WHITTEMORE, Robin; KNAFL, Kathleen. The Integrative Review: Updated Methodology. *Journal Of Advanced Nursing*, V. 52, N. 5, P. 546-553, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2648.2005.03621.x>.

- [19]. ZHONG, Ray Y.; XU, Chen; CHEN, Cheng; HUANG, George Q. Big Data Analytics For Physical Internet-Based Intelligent Manufacturing Shop Floors. International Journal Of Production Research, V. 55, N. 9, P. 2610-2621, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1245887>.
- [20]. ZHOU, Kai; LIU, Tong; ZHOU, Ling. Industry 4.0: Towards Future Industrial Opportunities And Challenges. Procedia Manufacturing, V. 3, P. 217-224, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.045>.