



**Tecnologias da Indústria 4.0 que evoluíram para a Indústria 5.0: Uma
revisão sistemática da literatura**

Gonzalo Fernandez

Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

e-mail: gonzalo.fernandez@ufrgs.br

* RECEBIDO em 05/11/2025. ACEITO em 04/01/2026.

Resumo

A transição da Indústria 4.0 para a Indústria 5.0 marca uma mudança de um modelo orientado pela tecnologia para uma abordagem centrada no ser humano, enfatizando a criatividade, o bem-estar e a inclusão na manufatura. Este estudo realiza uma revisão sistemática da literatura para explorar como as tecnologias da Indústria 4.0 podem evoluir para se alinhar aos princípios da Indústria 5.0. Sessenta e dois artigos revisados por pares foram analisados para identificar tecnologias-chave, como robôs colaborativos (*cobots*), inteligência artificial (IA) e realidade aumentada (RA). Essas tecnologias fortalecem a colaboração entre humanos e máquinas e promovem a capacitação dos trabalhadores. Os resultados revelam que, quando reorientadas para as necessidades humanas, essas tecnologias podem melhorar a segurança, a inclusão e a satisfação nos ambientes industriais. Esta pesquisa contribui para compreender como a inovação tecnológica pode ser integrada a valores centrados nas pessoas, oferecendo subsídios para pesquisadores, profissionais e formuladores de políticas na transição para sistemas industriais mais sustentáveis e humanizados.

Palavras-chave: Indústria 4.0; Indústria 5.0; Centralidade humana; Tecnologias evoluídas.

Abstract

The transition from Industry 4.0 to Industry 5.0 marks a shift from a technology-driven model to a human-centric approach, emphasizing creativity, well-being, and inclusion in manufacturing. This study conducts a systematic literature review to explore how Industry 4.0 technologies can evolve to align with Industry 5.0 principles. Sixty-two peer-reviewed articles were analyzed to identify key technologies, such as collaborative robots (cobots), artificial intelligence (AI), and augmented reality (AR). These technologies enable stronger human-machine collaboration and empower workers. The findings reveal that when reoriented toward human needs, these technologies can enhance safety, inclusion, and satisfaction in industrial environments. This research contributes to understanding how technological innovation can be integrated with human-centered values, providing insights for researchers, practitioners, and policymakers seeking to guide the transition toward more sustainable and people-focused industrial systems.

Keywords: Industry 4.0; Industry 5.0; Human-Centric; Evolved technologies.

1. Introdução.

Nos últimos anos, com a chegada da Quarta Revolução Industrial, as indústrias têm evoluído com a implementação de tecnologias avançadas em seus processos produtivos, o que é denominado transformação digital (KANS et al., 2024). Com um mercado que se torna mais exigente, as empresas são obrigadas a buscar constantemente formas de alcançar a máxima produtividade possível, implementando estratégias de redução de custos e aumentando a eficiência produtiva (ENRIQUE et al., 2023). Nesse cenário, surge a Indústria 4.0, que, por meio de tecnologias avançadas e da análise de dados em tempo real, transforma as organizações em sistemas inteligentes, melhorando a qualidade e o tempo na tomada de decisões, nos processos de produção e nos serviços prestados (LEE et al., 2015).

No entanto, no ano de 2011, a União Europeia lançou uma nova proposta de conceituação, denominada “Indústria 5.0”, que surge com o objetivo de guiar as empresas na implementação das tecnologias da Indústria 4.0 com uma perspectiva que engloba a sustentabilidade, a resiliência e a centralidade humana. É importante destacar que, como foi mencionado, o termo Indústria 5.0 é uma conceituação e não uma revolução, já que seu objetivo é fornecer maior valor à transformação industrial, como é o caso da Indústria 4.0 (XU et al., 2021).

Por isso, no desenvolvimento atual das empresas, a Indústria 5.0 é um tema relevante a partir da perspectiva que oferece para apoiar a transformação digital. A visão da “Indústria 5.0” reconhece o poder da indústria para alcançar objetivos sociais além do emprego e do crescimento, tornando-se um provedor resiliente de prosperidade, fazendo com que a produção respeite os limites do planeta e colocando o bem-estar dos trabalhadores da indústria no centro do processo de produção (*European Commission*, 2021, p. 14). Embora o conceito de Indústria 5.0 seja composto por três pilares: sustentabilidade, resiliência e centralidade humana (LENG et al., 2022), este estudo concentra-se no último pilar mencionado. A centralidade humana refere-se ao posicionamento do bem-estar dos trabalhadores da indústria no centro do processo de manufatura, em vez de um sistema centrado na melhoria da eficiência e qualidade, e na redução de custos (LU et al., 2022; NGUYEN et al., 2022).

Ao observar a literatura, existem muitas referências bibliográficas que tratam desse tema de forma geral, no entanto, até o momento, nenhum autor se aprofundou e/ou especificou as mudanças que experimentam as tecnologias da Indústria 4.0 e que determinam a maturidade ou nível de desenvolvimento dessa transição até alcançar um estágio de Indústria 5.0. Portanto, este artigo busca responder à seguinte pergunta de pesquisa: quais tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 estão evoluindo para serem adaptadas aos princípios da Indústria 5.0 centrado no humano e como pode ser avaliada essa adaptação na prática? Essa pergunta permite abordar os aspectos mais importantes que relacionam as tecnologias e aos indicadores de avaliação nessa transição para a Indústria 5.0. A importância deste estudo reside na necessidade de contar com um marco conceitual, através do qual as empresas possam ter maior conhecimento da situação real em que se encontram e planejar a situação ou estágio que pretendem alcançar.

Este artigo está organizado conforme a seguinte estrutura. Após esta introdução, a seção 2 apresenta os procedimentos metodológicos adotados na realização do trabalho, que especificamente baseia-se em uma revisão sistemática da literatura. Na seção 3 é realizada a descrição das informações extraídas da literatura. Posteriormente, a seção 4 analisa e discute as informações reunidas. Finalmente, um resumo das principais conclusões e sugestões para trabalhos futuros compõem a seção 5.

2. Metodologia.

Foi realizada uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) para sistematizar o corpo de pesquisa sobre as tecnologias que contam com a capacidade de se adaptar, especificamente ajudando na centralidade humana dos sistemas de manufatura 5.0 (ver Tabela 1).

No que diz respeito à formulação das perguntas de pesquisa, foram definidas duas questões principais, conforme apresentado na introdução. Essas perguntas foram respondidas a partir de uma análise de artigos que apresentam frameworks ou metodologias que avaliam o progresso da transição para um modelo de Indústria 5.0 centrado no pilar de “*Human-Centric*” nas empresas de manufatura, considerando os indicadores correspondentes.

A segunda etapa do método SLR teve como objetivo localizar estudos relacionados às perguntas de pesquisa e relevantes para a análise pretendida. Assim, um passo essencial compreendeu a escolha

dos motores de busca apropriados, a definição de consultas de pesquisa e o uso das convenções de pesquisa (Denyer & Tranfield, 2009). As bases de dados Scopus e *Web of Science* (WoS) foram adotadas como motores de busca, pois abrangem a maioria dos periódicos de gestão de operações e engenharia industrial que compreendem o escopo deste estudo. Como consultas de pesquisa, palavras-chave e títulos foram revisados para identificar um conjunto de termos relacionados tanto à Indústria 5.0 e *Human-Centric* quanto à indicadores. As consultas de pesquisa foram definidas com base em palavras-chave usadas em revisões de literatura anteriores que abordaram tópicos relacionados à indústria 5.0 e centralidade humana na manufatura. (ALVES et al., 2023; ZHANG et al., 2023). Portanto, como o objetivo deste artigo é identificar as tecnologias da Indústria 4.0 que podem evoluir para serem adaptadas e utilizadas em uma Indústria 5.0, considerando o pilar de centralidade humana, as *strings* de pesquisa foram desenhadas para encontrar os documentos que se referem exclusivamente a esse campo da literatura.

A estratégia de busca foi elaborada usando operadores lógicos e booleanos para identificar estudos que contenham pelo menos uma das palavras-chave de cada um dos dois principais grupos de consulta de pesquisa, presentes no título, resumo ou palavras-chave, na base de dados Scopus, e no tópico (título, resumo, palavras-chave dos autores, palavras-chave expandidas) na WoS. Um total de quatro palavras-chave para o conjunto de indicadores, seis para o conjunto de “*Human-Centric*” e uma palavra para se referir ao termo de “Indústria 5.0”. Essas palavras-chave, assim como as *strings* usadas nas bases de dados, são mostradas na sequência:

("Industry 5.0") AND ("Human-Centric" OR "Human-Centricity" OR "Human-Centric Industry" OR "Human-Centric Manufacturing" OR "Human-Centered" OR "Human-Machine Collaboration") AND (Indicators OR Implementation OR Assessment OR Evaluation)

Ao utilizar essas palavras-chave e termos de busca, foram identificados um total de 457 artigos nas bases de dados consultadas, dos quais 189 estavam na WoS e 268 na Scopus. Os termos de busca foram todos em inglês.

Com base nos resultados primários obtidos, foram estabelecidos critérios para realizar um processo de filtragem, que consiste numa seleção e avaliação destes primeiros artigos, com o objetivo de reter finalmente apenas os artigos científicos relevantes, que estão mais estreitamente relacionados com a questão de investigação.

Como primeiro critério de filtragem, foi estabelecido que apenas serão considerados os artigos publicados após o ano de 2021, dado que este foi o ano em que o conceito de “Indústria 5.0” foi criado pela União Europeia, pelo que foram excluídos 5 documentos. Posteriormente, foram excluídos 173 documentos devido à filtragem por área de interesse, dado que, para este estudo, apenas são relevantes as seguintes áreas: “*Engineering*”; “*Engineering industrial*”; “*Engineering manufacturing*”; “*Engineering Multidisciplinary*”; “*Business, Management and Accounting*”; “*Automation Control Systems*”; “*Operations Research Management Science*”. O critério de purificação seguinte foi o “Tipo de documento”, pois só serão admitidos documentos que sejam, de facto, artigos científicos, excluindo 140 documentos. Por último, apenas foram considerados os artigos publicados em inglês, o que significa que 0 artigos publicados em outras línguas foram eliminados da revisão. Após o uso desses critérios, restaram 26 artigos duplicados, que também foram deduzidos da seleção final. O seguinte critério de filtragem consistiu em deixar fora da análise 44 artigos que não possuem acesso aberto total. Finalmente, 21 artigos foram excluídos da revisão após a leitura por não estarem associados ao tema de investigação do presente estudo. Posteriormente foram adicionados na análise 14 artigos encontrados em pesquisas externas que foram realizados de forma manual e que cumprem com os critérios desenvolvidos anteriormente. Aliás, esses artigos extras foram considerados dado que tinham uma relação direta com a temática de pesquisa. Como resultado, 62 artigos foram lidos na íntegra para a etapa de análise e síntese detalhada. A Figura 1 resume de forma gráfica o método de seleção de artigos adotado neste estudo, apresentado os estágios e filtros aplicados.

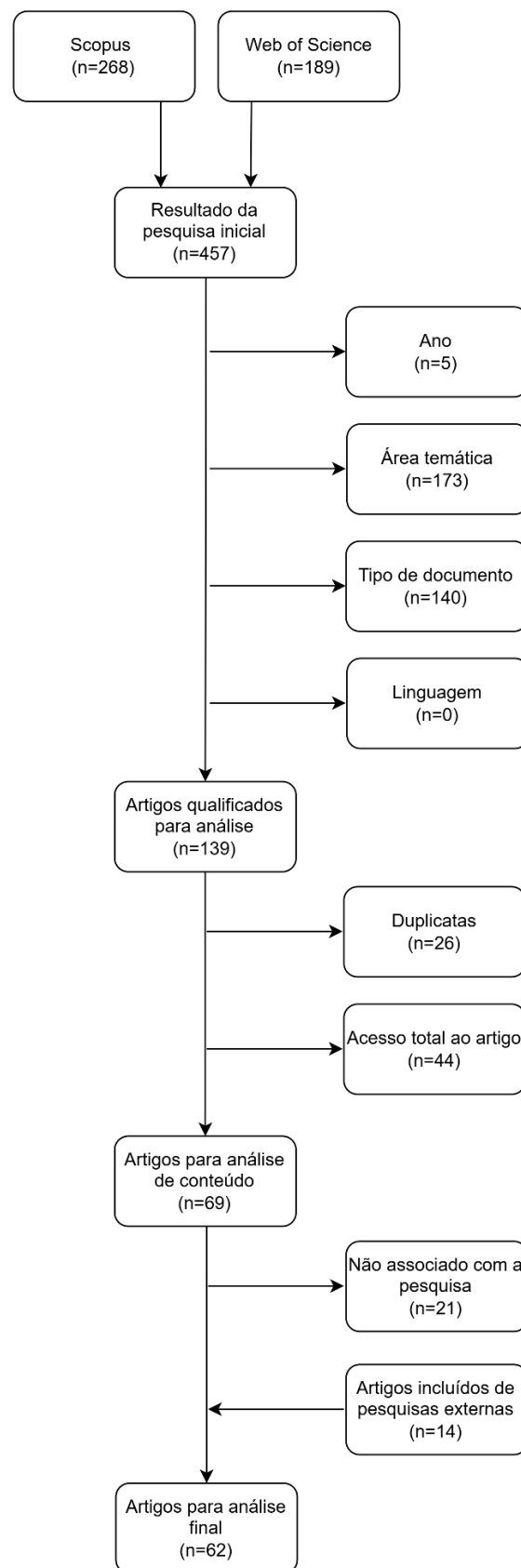


Figura 1 – Metodologia de revisão sistemática da literatura. Fonte: Elaborado pelo Autor (2025).

Na sequência, apresenta-se a conceituação do principal termo envolvido nesse estudo, o de “Indústria 5.0”. Logo, os resultados derivados da revisão da literatura realizada são apresentados em três diferentes dimensões gerais, que compõem conjuntamente o pilar de *Human-Centric* dentro do conceito de Indústria 5.0. Em primeiro lugar, é enunciada a dimensão de “Gestão e Cultura Organizacional”, onde se encontram aqueles aspectos mais empresariais de uma organização. Logo, é descrita a dimensão de “Bem-estar e Satisfação do Operador”, que envolve os fatores que afetam e influenciam diretamente o desempenho dos trabalhadores. Finalmente, a terceira dimensão é a de “Tecnologias Colaborativas”, que traz a explicação de diferentes tecnologias destacadas nos postos de trabalho dos operadores, as quais podem ou não ser usadas diretamente por eles e que geram algum tipo de impacto nos mesmos.

Na Figura 2, é apresentada uma ilustração gráfica que facilita o entendimento do que foi explicado previamente.



Figura 2 – Dimensões do pilar *Human-Centric* da Indústria 5.0. Fonte: Elaborado pelo Autor (2025).

3. Revisão da literatura.

3.1. Indústria 5.0 e centralidade humana.

A conceituação de Indústria 5.0 foi criada em 2021 pela União Europeia com o objetivo de agregar valor à Quarta Revolução Industrial, apoiando a transição ou transformação digital trazida pela Indústria 4.0 (XU et al., 2021). É importante destacar que a Indústria 5.0 não pode ser considerada como uma evolução cronológica da Indústria 4.0, mas sim como uma extensão que complementa suas vantagens ao introduzir sustentabilidade, centralidade humana e resiliência como objetivos principais (GÓRNY et al., 2023). Enquanto a Indústria 4.0 traz uma mudança disruptiva na forma de executar os processos industriais, impulsionada pela implementação de tecnologias avançadas nos sistemas de manufatura, a Indústria 5.0 busca reforçar o valor das transformações realizadas nas empresas, propondo uma perspectiva mais amigável ao meio ambiente, mais flexível e ágil diante de potenciais desvios, e mais focada no bem-estar dos trabalhadores (VAN ERP et al., 2024).

Segundo MOURTZIS et al. (2024), a Indústria 5.0 destaca a importância da interação humana e da colaboração entre humanos e máquinas. Além disso, esse novo conceito representa uma agenda voltada para o futuro, complementando as características únicas da Indústria 4.0 e buscando alcançar um equilíbrio entre crescimento econômico e desenvolvimento socioambiental, o que implica uma colaboração integrada entre a indústria e as partes interessadas (GHOBAKHLOO et al., 2023). Concluindo, a Indústria 5.0 é proposta como um avanço evolutivo, incremental e criticamente necessário que se baseia no conceito e nas práticas da Indústria 4.0 (HEIN-PENSEL et al., 2023).

Mais especificamente, o pilar de Centralidade Humana refere-se ao design de sistemas produtivos que colocam os seres humanos no centro do processo de produção, considerando suas

competências, necessidades e desejos, e garantindo que eles estejam no controle do processo, assegurando a saúde e o trabalho interativo (HERMAWATI et al., 2024). É crucial posicionar o ser humano no centro da produção, oferecendo oportunidades para adquirir novas habilidades, melhorando sua percepção sobre a transformação digital e permitindo que assuma tarefas mais desafiadoras que demandem capacidade de resolver problemas (LI et al., 2024).

3.2. Dimensões do pilar “*human-centric*” da indústria 5.0.

O modelo de *Human-Centric* da Indústria 5.0 pode ser representado a partir da integração de três grandes dimensões (GÓRNY et al., 2023), como representado na Figura 2, dentro das quais são identificados os indicadores que determinam a transição bem-sucedida para este novo modelo de indústria. As dimensões mencionadas são:

- Gestão e cultura organizacional: refere-se às práticas, ideologias e valores nos quais se desenvolve uma empresa.
- Bem-estar e satisfação do trabalhador: esta dimensão é conformada pelos aspectos e sentimentos que afetam a performance do trabalhador dentro do seu espaço ou ambiente de trabalho.
- Tecnologias colaborativas: são as tecnologias que conseguem assistir e auxiliar aos trabalhadores nas suas atividades ao longo da sua jornada de trabalho.

Para que uma empresa implemente uma transição correta a um ambiente de trabalho “*Human-Centric*” é fundamental que os três grandes aspectos mencionados anteriormente, estejam integrados de forma conjunta (RIBEIRO et al., 2024). Em outras palavras, este ambiente de trabalho centrado no humano, vê-se afetado por diversos atores como são as pessoas que gerenciam e replicam a cultura organizacional da empresa, as máquinas e robôs envolvidos dentro de planta industrial e os operadores que constituem a esfera humana de um processo produtivo. A seguir, cada uma das três dimensões mencionadas será descrita com maior profundidade, identificando os pontos chave de cada dimensão, que caracterizam um ambiente de trabalho centrado no humano.

3.2.1. Gestão e cultura organizacional.

Esta dimensão refere-se às pessoas responsáveis pelos níveis hierárquicos mais altos de um sistema de manufatura, que são encarregadas do planejamento estratégico e da tomada de decisões, transmitindo os valores e ideais da empresa, bem como sua cultura organizacional. ERRO-GARCÉS et al. (2023) e PLOOY et al. (2024) concordam que essa dimensão interfere diretamente no ambiente de trabalho e, por conseguinte, nas rotinas dos trabalhadores. Gestão e cultura organizacional afetam, seja de forma positiva ou negativa, o desempenho das atividades que os operadores realizam.

Nesta dimensão, a consideração de questões éticas e humanas é fundamental para o sucesso dos projetos que buscam implementar organizações centradas no ser humano. Isso se deve ao fato de que a adoção de práticas de gestão adequadas na Indústria 5.0 facilita a integração eficaz de novas tecnologias nos processos produtivos. Ao analisar os pontos de vista das partes interessadas, essas práticas promovem uma abordagem mais inclusiva e eficiente, o que é essencial em qualquer iniciativa que implique a integração de tecnologias inovadoras. Portanto, é fundamental ouvir e considerar as perspectivas e sentimentos dos operadores que trabalharão no mesmo ambiente com essas novas tecnologias, para que sua implementação seja bem-sucedida. Complementarmente, devem ser analisados aspectos inerentes aos trabalhadores, especificamente habilidades e competências, tanto físicas quanto cognitivas, de cada indivíduo. Além disso, a aplicação de tecnologia nos postos de trabalho deve priorizar a redução da carga cognitiva do operador, assim como a diminuição dos riscos ergonômicos aos quais ele possa estar exposto (CHAN et al., 2023; GÄRTNER et al., 2023; GÓRNY et al., 2023; VAN OUDENHOVE et al., 2023; MEREGALLI et al., 2024; OEIJ et al., 2024; VAN ERP et al., 2024).

Adicionalmente, nesta dimensão delimita-se a responsabilidade de adotar estratégias que contribuam tanto para o sucesso a longo prazo na interação entre humanos e tecnologias quanto para o desenvolvimento da resiliência nos sistemas de manufatura. Essas estratégias devem estar relacionadas com a participação ativa de todos os operadores em projetos de inovação da empresa; à colaboração entre equipes de diferentes áreas; o aprendizado contínuo de novas habilidades e competências; e a colaboração harmoniosa entre os humanos e a tecnologia. Dessa forma, é possível garantir que aspectos

como a satisfação e o bem-estar dos trabalhadores sejam preservados e até mesmo potencializados, caracterizando o ambiente *Human-Centric* da Indústria 5.0 (BABKIN et al., 2022; HEIN-PENSEL et al., 2023; CALLARI et al., 2024; HANSEN et al., 2024; HERMAWATI et al., 2024; VUKELIC et al., 2024; TRSTENJAK et al., 2024).

3.2.2. Bem-estar e satisfação do trabalhador.

Dentro dos sistemas de manufatura, e inclusive com a aplicação inadequada de determinadas tecnologias, os trabalhadores podem sofrer consequências tanto físicas quanto psicológicas. Para atender às necessidades físicas dos operadores, é importante considerar avaliações ergonômicas no design dos ambientes de trabalho. Além disso, a Indústria 5.0 tem como um de seus objetivos principais a mitigação dos riscos de segurança que ameaçam a saúde física do operador. Por outro lado, em relação ao aspecto psicológico, um ambiente de trabalho *human-centric* procura fomentar e melhorar a saúde mental das pessoas envolvidas no processo produtivo. A partir da chegada da Indústria 4.0, o uso de algumas tecnologias específicas nos postos de trabalho tem gerado situações que impactaram negativamente os aspectos emocionais dos trabalhadores (RESCIO et al., 2023; KATSAMPIRIS-SALGADO et al., 2024).

Portanto, a Indústria 5.0 propõe ambientes de trabalho centrados no humano, cujos designs contribuem estrategicamente para melhorar o bem-estar e a satisfação dos operadores, integrando-os com tecnologias avançadas e agilidade organizacional, o que resulta no aumento da eficiência produtiva do processo como um todo (BRUNNER et al., 2024; RUIZ et al., 2024; NAZAREJOVA et al., 2024).

Conforme vários autores (APRAIZ et al., 2023; GERVASI et al., 2023; SIMEONE et al., 2024; YASUE et al., 2025), dentro das empresas são tomadas inúmeras decisões e projetadas diferentes configurações nos postos de trabalho que afetam negativamente a psique dos trabalhadores. Esses problemas podem ser evidenciados como: falta de personalização nas configurações produtivas e nas interações entre humanos e robôs; sobrecarga cognitiva ao considerar um excesso de variáveis a serem analisadas por um trabalhador ao realizar sua tarefa, o que gera estresse; tecnologias que causam tensões negativas nos trabalhadores que precisam interagir com elas; falta de confiabilidade no processo produtivo devido às paradas constantes; falta de autonomia, autogestão e capacidade de tomada de decisão por parte dos próprios trabalhadores em suas atividades.

Por isso, diversos autores afirmam que a Indústria 5.0 traz alguns direcionamentos e princípios para melhorar o bem-estar e a satisfação dos trabalhadores nas organizações, aprimorando seu desempenho operacional. Esses direcionamentos estão relacionados a estratégias como a proposta de planos flexíveis de rotação, que oferecem aos trabalhadores a oportunidade de enriquecer suas competências por meio da experiência de executar diferentes tarefas em curto prazo; a introdução de tecnologias que permitam monitorar, em tempo real, a saúde e os riscos aos quais um operador pode estar exposto, por meio da digitalização das tarefas manuais; a implementação de tecnologias que melhoram a produtividade e a flexibilidade por meio do balanceamento das linhas de processos, como os *cobots*; e a digitalização dos manuais de procedimentos que orientam os trabalhadores na execução de uma tarefa específica (BRUNZINI et al., 2023; CALZAVARA et al., 2023; NOURMOHAMMADI et al., 2023; SIMEONE et al., 2023; CALZAVARA et al., 2024; COLABIANCHI et al., 2024; GUALTIERI et al., 2024; TOMELLERI et al., 2024; VILLANI et al., 2024).

3.2.3. Tecnologias colaborativas.

É fundamental reconhecer que a dimensão *human-centric* é essencial na Indústria 5.0, pois ela potencializa o valor das tecnologias avançadas introduzidas pela Indústria 4.0. Essa abordagem não apenas promove a integração dessas tecnologias, mas também garante que seu uso seja orientado para o bem-estar humano e a sustentabilidade, conforme destacado por XU et al. (2021). Portanto, essas tecnologias devem formar parte de uma dimensão, que é, de fato, fundamental para alcançar postos de trabalho centrados no humano quando combinados os setores de OT (Tecnologias de Operações) e IT (Tecnologias de Informação) de uma empresa (COTTA et al., 2023).

Para alcançar um estágio de centralidade humana dentro de uma empresa, é primordial que exista uma interação colaborativa entre os humanos e a tecnologia, criando uma situação de simbioses entre ambas as partes envolvidas. A partir disso, os operadores devem ser beneficiados por diferentes aspectos com a introdução de tecnologias em seus postos de trabalho. Assim, as soluções tecnológicas

integradas aos processos produtivos devem contribuir para o desempenho adequado do trabalhador. Com a chegada da Indústria 4.0, é frequentemente observado que o principal objetivo da implementação de tecnologias nas atividades de uma linha de processo é o aumento da eficiência produtiva. No entanto, a Indústria 5.0 propõe uma mudança de perspectiva nas empresas, o que implica outras prioridades, como, por exemplo, reduzir a carga cognitiva dos trabalhadores; diminuir os riscos de os operadores sofrerem lesões físicas; e melhorar as experiências das pessoas em sua jornada laboral (PAKORNI et al., 2022; GERVASI et al., 2023; CALZAVARA et al., 2024; NAGY et al., 2024; NAZAREJOVA et al., 2024; RUIZ et al., 2024; TRSTENJAK et al., 2024).

Revisada a literatura, foram identificadas várias tecnologias cujas características e funções contribuíram em uma transição bem-sucedida à Indústria 5.0. A seguir, são explicadas cada uma delas, detalhando também os efeitos que causam no operador que as está utilizando.

3.2.3.1. Inteligência artificial.

A Inteligência Artificial (IA) desempenha um papel central na construção de processos produtivos centrados no ser humano, ao promover maior segurança, eficiência e colaboração nos ambientes industriais, permitindo desde a previsão de movimentos dos trabalhadores e a prevenção de colisões entre robôs colaborativos e operadores até a redução da carga cognitiva por meio de suporte à tomada de decisão e instruções digitais mais eficazes do que manuais físicos (ROZANEC et al., 2024; COLABIANCHI et al., 2024; KATSAMPIRIS et al., 2024). Além disso, a IA viabiliza treinamentos personalizados conforme as capacidades e limitações individuais, otimiza a ergonomia e o desempenho em postos com interação humano-máquina, apoia decisões estratégicas por meio da simulação de cenários produtivos e fornece informações em tempo real para atividades de manutenção, contribuindo de forma integrada para sistemas produtivos mais seguros, personalizados e eficazes, com forte enfoque *human-centric* (TURNER et al., 2022).

3.2.3.2. Gêmeos digitais (*Digital Twins*).

Os gêmeos digitais, também conhecidos pelo termo em inglês "*Digital Twins*" (DT), permitem integrar de maneira virtual os trabalhadores aos processos produtivos, criando um ecossistema digital onde máquinas e operadores interagem de forma otimizada. Os DTs replicam digitalmente cada operador, coletando atributos humanos como fadiga, concentração, afeto e atenção, o que facilita o planejamento da produção, melhora a eficiência e otimiza a operação do processo. Essa tecnologia permite monitorar e gerenciar a planta com um enfoque centrado no ser humano, fornecendo uma visão detalhada dos riscos ergonômicos dos operadores, o que contribui para a criação de fábricas mais seguras, eficientes e adaptadas às necessidades dos trabalhadores (DOBAJ et al., 2023; FAN et al., 2023; NOURMOHAMMADI et al., 2023; CORONADO et al., 2024; LI et al., 2024; MARTINEZ et al., 2024; RUIZ et al., 2024; VILLANI et al., 2024).

3.2.3.3. *Big data*.

Essa tecnologia se refere ao uso de grandes volumes de dados, a partir dos quais podem ser gerados insights importantes que beneficiam, de alguma forma, a empresa. O *Big Data* apoia os trabalhadores na tomada de decisões, permitindo reduzir a carga cognitiva dos mesmos. Essa tecnologia pode ser utilizada tanto nos níveis operacionais quanto nos níveis estratégicos de direção e gerência. Quando o *Big Data* é complementado com a expertise dos gerentes, os processos de tomada de decisão alcançam resultados ainda mais eficientes e precisos (BAJIC et al., 2023; NEUNZIG et al., 2023).

3.2.3.4. Veículos aéreos não tripulados (Drones).

Os veículos aéreos não tripulados, conhecidos especificamente como "Drones", desempenham um papel importante nas empresas centradas no ser humano. Essa tecnologia pode ser utilizada para realizar rotinas de inspeção de equipamentos e infraestrutura, ou transferências de materiais, melhorando os processos de manufatura e logística. Dessa forma, os postos de trabalho tornam-se mais seguros, graças à redução dos riscos de insegurança que os drones proporcionam nesses processos. Além disso,

em termos gerais, essas tecnologias conseguem melhorar a eficiência produtiva global das organizações (MOURTZIS et al., 2024).

3.2.3.5. Exoesqueletos.

Os exoesqueletos estão emergindo como uma tecnologia-chave para tornar as indústrias mais centradas no ser humano, abordando aspectos críticos como ergonomia, produtividade e melhoria contínua. Esses dispositivos assistem fisicamente os trabalhadores e coletam dados detalhados sobre movimentos e posturas, permitindo diagnósticos ergonômicos precisos e comparações com movimentos ideais hipotéticos. As informações coletadas são fundamentais para desenvolver planos de melhoria individuais e sistêmicos, beneficiando as organizações a curto e longo prazo, ao otimizar o desempenho dos trabalhadores e promover ambientes mais seguros e eficientes. Além disso, os exoesqueletos alinham-se aos princípios do *Lean 4.0*, integrando digitalização e análise de dados em estratégias voltadas à melhoria contínua e à sustentabilidade. Assim, essa tecnologia fortalece a relação entre trabalhadores e máquinas, impulsionando a transição para uma indústria mais humanizada, eficiente e preparada para os desafios futuros (TRAN et al., 2023).

3.2.3.6. Sistemas *cyber*-físicos.

O uso de sistemas *cyber*-físicos na indústria busca criar aplicativos que melhorem a experiência do usuário, priorizando sempre o bem-estar e a satisfação dos trabalhadores. O desenvolvimento desses aplicativos deve ser inclusivo, considerando tanto pessoas com deficiências (PCDs) quanto trabalhadores sem formação técnica, com o objetivo de promover um ambiente de trabalho mais acessível e eficiente. No "ambiente de manufatura", são integrados dados fisiológicos do trabalhador, condições ambientais (como temperatura, umidade, iluminação e ruído) e dados das máquinas (vibração, emissões de som e temperatura). Todos esses dados são analisados na nuvem para avaliar o risco geral e melhorar tanto a produtividade quanto o bem-estar dos empregados (CORONADO et al., 2023; FRAGA et al., 2022; SIMEONE et al., 2023).

3.2.3.7. Robôs colaborativos (*cobots*).

A introdução de robôs colaborativos (*cobots*) na indústria logística melhora a satisfação, autoestima e eficiência dos operadores, criando um ambiente mais centrado no ser humano. Os trabalhadores experimentam níveis maiores de satisfação quando controlam o robô, o que lhes confere autonomia e reforça sua autoestima. No entanto, mesmo quando são guiados pelo *cobot*, os benefícios permanecem, como a redução da carga mental e dos erros, o que melhora o bem-estar geral. Além disso, os operadores se sentem valorizados ao interagir com os robôs, o que fortalece a relação entre ambos (PASPARAKIS et al., 2023). O uso de *cobots* também permite equilibrar a carga de trabalho entre humanos e robôs, otimizando a produtividade sem comprometer o bem-estar do trabalhador. Um sistema de localização e atribuição de tarefas pode melhorar a eficiência e reduzir o esforço físico e mental do operador, criando um ambiente mais saudável e sustentável. É fundamental atribuir estrategicamente as tarefas entre o trabalhador e o *cobot*, o que não só melhora o bem-estar do operador, mas também maximiza a produtividade da empresa, gerando uma sinergia entre as capacidades humanas e tecnológicas (CALZAVARA et al., 2023; DORNELLES et al., 2023).

3.2.3.8. Realidade aumentada.

O uso de Realidade Aumentada (AR) nas indústrias tem se mostrado eficaz na criação de um ambiente de trabalho centrado no ser humano, especialmente ao reduzir a carga de trabalho, ansiedade e estresse dos operadores em tarefas que envolvem procedimentos longos. Durante o treinamento, a AR oferece instruções digitais que melhoram o aprendizado, sendo importante que o instrutor dê conselhos apenas antes da simulação. O uso de AR/VR também aproxima os trabalhadores do ambiente real, melhorando as condições cognitivas e emocionais. Contudo, o uso excessivo de tecnologias avançadas pode retardar a curva de aprendizagem e aumentar o estresse (BRUNZINI et al., 2023).

A realidade aumentada, aliada a uma abordagem de pensamento *Lean*, facilita a adaptação rápida de tecnologias e a melhoria contínua dos processos produtivos. Além disso, a AR ajuda a identificar riscos de segurança e melhorar as condições ergonômicas dos operadores, promovendo um ambiente mais seguro e confortável, sem comprometer a eficiência e priorizando o bem-estar dos trabalhadores (PEREIRA et al., 2023).

3.2.3.9. Tecnologias vestíveis.

Como mencionado por ORSO et al., (2022), as "*wearable technologies*" (tecnologias vestíveis), como os relógios inteligentes (*smartwatches*) e os luvas inteligentes (*smart gloves*), estão emergindo como ferramentas essenciais para tornar as organizações mais centradas no ser humano. Esses dispositivos não apenas proporcionam conforto e assistência direta ao trabalhador, mas, quando combinados com outras tecnologias, permitem um monitoramento contínuo do operador. Os dados coletados por meio desses dispositivos são valiosos, pois fornecem informações precisas sobre as condições físicas, o desempenho e a saúde do trabalhador em tempo real. Essas informações podem ser utilizadas para tomar decisões informadas, otimizando a atribuição de tarefas, melhorando a segurança no trabalho e contribuindo para o bem-estar do trabalhador. Ao integrar essas tecnologias nos processos industriais, cria-se um ambiente de trabalho mais eficiente, personalizado e centrado no bem-estar humano.

3.2.3.10. Internet das coisas (IoT).

A tecnologia IoT é fundamental para criar indústrias mais centradas no ser humano, pois permite, por exemplo, monitorar a resiliência física dos operadores em sistemas de manufatura. Dispositivos IoT coletam dados importantes, como a identificação de posturas com maior risco musculoesquelético, os grupos musculares que sofrem mais estresse e o reconhecimento automático de quando os trabalhadores realizam tarefas manuais. Essas informações permitem identificar perigos potenciais e deficiências ergonômicas, facilitando a implementação de estratégias para reduzir riscos. Além disso, o uso de sensores que monitoram em tempo real o movimento e a respiração dos trabalhadores melhoram a segurança e o bem-estar, permitindo tomar decisões informadas que otimizam tanto a produtividade quanto as condições de trabalho (ISLAM et al., 2022; TOMELLERI et al., 2024; ÖZDEMİR et al., 2018).

4. Análise e discussão.

Nesta subseção, é descrita a estruturação da rastreabilidade dos achados na revisão sistemática da literatura que foi feita anteriormente. No nível mais alto desta estrutura, se situam as duas dimensões que se relacionam com o capital humano e afetam a transição em direção a Indústria 5.0 centrada no humano. Este primeiro nível está composto pelas dimensões "Gestão e Cultura Organizacional" e "Bem-estar e Satisfação do Operário".

Tabela 1 – Associação das tecnologias colaborativas com as outras dimensões do pilar de *human-centric* da Indústria 5.0.

Dimensões	Tecnologias	Aplicação	Referências
Gestão e Cultura Organizacional	Inteligência Artificial	Simulação de processos produtivos mais seguros e personalizados	[64]
		Distribuições otimizadas em planta	[10]; [32]
	Digital Twins	Monitoramento em tempo real dos trabalhadores na planta	[15]; [21]; [46]; [12]; [36]; [39]; [68]
	Big Data	Tomada de decisões mais eficientes	[4]; [44]
	Sistemas Cyber-Físicos	Otimização da eficiência operacional e energética da planta	[22]

Bem-estar e Satisfação do Operário	Inteligência Artificial	Redução da carga cognitiva nos postos de trabalho	[64]
	Veículos Aéreos não Tripulados	Realização das rotinas de inspeção melhorando o processo de manufatura	[41]
		Transferência de materiais melhorando o processo de logística	[41]
	Exoesqueletos	Melhoria na ergonomia e eficiência produtiva dos trabalhadores	[62]
	Sistemas Cyber-Físicos	Melhoria da qualidade do ambiente de trabalho	[11]; [59]
	Robôs Colaborativos	Redução da carga mental e dos erros	[51]
		Valorização ao interagir com robôs	[51]
		Distribuição da carga de trabalho da linha de produção	[8]; [16]
	Realidade Aumentada	Instruções digitais que melhoram o aprendizado	[6]
		Adaptação mais rápida ao uso de tecnologias	[52]
	<i>Wearable Technologies</i>	Monitoramento contínuo das condições físicas e laborais	[49]
	Internet das Coisas	Identificação de perigos e deficiências ergonômicas	[33]; [61]
		Monitoramento em tempo real dos movimentos e a respiração	[33]; [61]

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

4.1. Explicação dos achados.

Conforme mencionado na introdução, as tecnologias da Indústria 4.0 chegaram aos sistemas de manufatura para melhorar a eficiência produtiva e reduzir os custos operacionais. No entanto, a partir dos resultados encontrados nesta revisão sistemática da literatura, foram identificadas dez dessas tecnologias cuja utilização evoluiu de alguma forma para se adaptar aos princípios propostos pelo conceito de Indústria 5.0 dentro do pilar "*Human-Centric*". Essa evolução representa, especificamente, uma mudança no uso dessas tecnologias, que não são necessariamente adquiridas pelas indústrias apenas para obter benefícios relacionados ao processo, mas são incorporadas aos postos de trabalho e aos níveis estratégicos da organização para auxiliar as pessoas em suas atividades.

No que diz respeito ao nível estratégico de uma empresa, as tecnologias identificadas foram englobadas dentro da dimensão de "Gestão e Cultura Organizacional". A primeira dessas tecnologias é a Inteligência Artificial, que pode ser utilizada para realizar distribuições na planta mais eficientes, por meio de simulações de processos produtivos mais seguros contra acidentes de trabalho e mais personalizados de acordo com as competências e limitações de cada trabalhador. Outra tecnologia mencionada nos artigos revisados é a denominada *Digital Twins* (em inglês), que se traduz como "gêmeos digitais". É por meio dessa tecnologia que é possível realizar monitoramentos em tempo real do comportamento e dos efeitos que os trabalhadores podem ter dentro da fábrica ao executarem suas respectivas tarefas. De alguma forma, essas tecnologias devem estar relacionadas a uma das mais importantes para a Indústria 4.0, que é o *Big Data*, a partir do qual os gerentes e diretores das organizações conseguem tomar decisões mais precisas e rápidas. Por fim, no que se refere à tecnologia de sistemas ciber-físicos, ela pode ser utilizada pelo nível estratégico das empresas como fornecedora de informações por meio de indicadores de otimização operacional e energética das plantas de produção.

Em relação aos níveis operacionais das empresas, as tecnologias identificadas são descritas a seguir. Em primeiro lugar, aparece novamente a inteligência artificial, que é utilizada nos postos de trabalho para reduzir a carga cognitiva dos operadores. Em seguida, aparecem os veículos aéreos não tripulados, também conhecidos como "drones", que, segundo a literatura, são utilizados para realizar tarefas de inspeção de qualidade nos sistemas de manufatura e contribuem nos processos logísticos com o transporte de bens e materiais. Outra tecnologia identificada são os exoesqueletos, que são fundamentais para ajudar fisicamente os operadores de produção, melhorando a ergonomia e a eficiência nos locais de trabalho. Posteriormente, é mencionada a tecnologia de sistemas ciber-físicos, que, por meio do fluxo de informações que fornecem, podem melhorar a qualidade dos ambientes de trabalho.

Outra tecnologia importante no desenvolvimento de processos centrados no humano são os *cobots*, que, se manipulados de forma estratégica, podem reduzir significativamente a carga mental e os erros das pessoas, distribuindo as tarefas nas linhas de produção, além de gerar valorização pessoal para os operadores que interagem com eles. Por outro lado, a Realidade Aumentada pode ser utilizada para digitalizar os manuais de instruções das tarefas dos trabalhadores, agilizando o aprendizado e permitindo uma maior adaptação à inserção das tecnologias no ambiente de trabalho.

Adicionalmente, as tecnologias vestíveis, como por exemplo os relógios inteligentes, podem ser usadas para realizar medições de parâmetros físicos e laborais relacionados à pessoa que está executando a tarefa de manufatura. Por fim, o IoT, também oferece uma contribuição importante, pois permite identificar os perigos de acidentes no trabalho, bem como as deficiências ergonômicas que os operadores possam sofrer, monitorando em tempo real os movimentos e a respiração das pessoas em cada posto de trabalho.

4.2. Como as tecnologias da indústria 4.0 evoluíram a través das dimensões do pilar de *human-centric* da indústria 5.0.

A partir dos achados do presente estudo, é possível perceber que tanto a perspectiva das empresas quanto as formas como utilizam as tecnologias da Indústria 4.0 precisam ser transformadas, buscando ajudar e apoiar os trabalhadores envolvidos no processo produtivo (RAUCH et al., 2020). Por isso, quando uma empresa de manufatura incorpora essas mudanças na fábrica, pode-se considerar que a transição para uma Indústria 5.0 centrada no humano foi realizada com sucesso.

Por outro lado, apesar das dez tecnologias identificadas por meio da revisão sistemática da literatura contribuírem para a transição, não é necessário que todas elas tenham evoluído em sua usabilidade para que a empresa em questão possa ser considerada como 5.0. No entanto, pode-se considerar que, para que a transição ocorra, tanto o nível estratégico quanto o operacional devem ser apoiados por alguma das tecnologias descritas anteriormente. Além disso, segundo DU PLOOY et al., 2024, as inovações digitais implementadas (qualquer seja a tecnologia em questão) nas empresas devem considerar os riscos que provocam de forma individual nos trabalhadores.

Tendo em consideração um outro sentido de análise, essa evolução das tecnologias para uma Indústria 5.0 também deve considerar os outros aspectos que a Indústria 4.0 contempla, tais como a cadeia de suprimentos além da manufatura em si, algo que foi sustentando por diversos autores como LIBONI et al., (2019) e NÚÑEZ et al., (2020).

Por fim, é importante destacar que a tecnologia mencionada pelo maior número de autores foi a denominada *Digital Twins*. Isso revela a grande importância atribuída à integração de modelos digitais tanto dos operadores quanto das plantas de produção, permitindo simular e/ou monitorar os processos de forma mais realista e precisa. Estes tipos de tecnologias contribuem no bem-estar dos operários dentro das indústrias dado que fornecem assistência cognitiva visando reduzir a carga mental dos trabalhadores, conforme sustenta o estudo de POKORNI et al., (2022).

Na sequência, é apresentada uma ilustração que resume de forma gráfica os achados detalhados e a lógica com a qual foi desenvolvido o presente estudo.

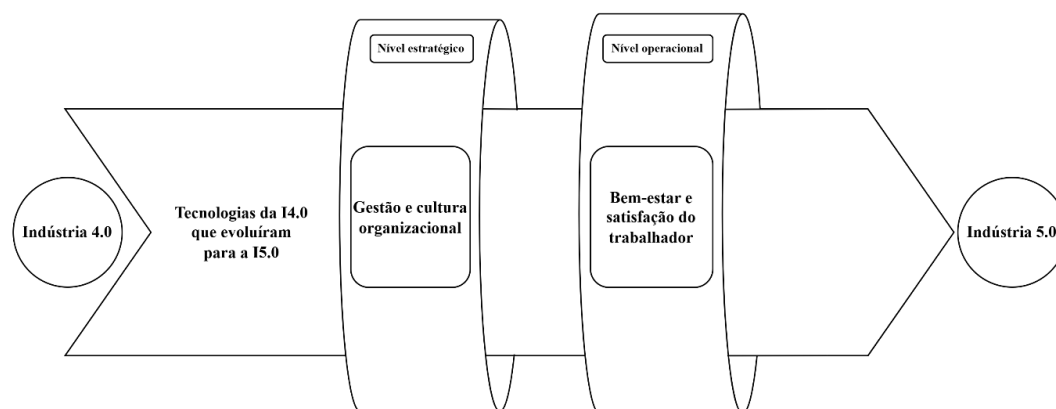


Figura 3 - Representação de como as tecnologias da I4.0 evoluem pelos níveis estratégico e operacional de uma empresa para alcançar a I5.0 centrada no humano. Fonte: Elaborado pelo Autor (2025).

5. Conclusões.

A partir da realização de uma revisão sistemática da literatura, com a leitura e análise detalhados de 62 artigos relacionados com a Indústria 5.0, o objetivo deste trabalho foi responder a seguinte questão de pesquisa: quais tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 estão evoluindo para serem adaptadas aos princípios da Indústria 5.0 centrado no humano e como pode ser avaliada essa adaptação na prática? A partir disso, foi possível identificar os aspectos relevantes na transição para a Indústria 5.0 focada, especificamente, no pilar *Human-Centric*.

Este estudo teve como principais resultados a identificação de três grandes dimensões que compõem o pilar de centralidade humana da Indústria 5.0. São elas: (i) Gestão e cultura organizacional; (ii) Bem-estar e satisfação do trabalhador; e (iii) Tecnologias colaborativas. A primeira dimensão faz alusão à parte estratégica das empresas, incluindo as políticas e valores que influenciam o desenvolvimento cotidiano das atividades de qualquer organização. A dimensão de “bem-estar e satisfação do trabalhador” refere-se aos comportamentos e sentimentos dos trabalhadores no nível operacional de um sistema de manufatura, e como isso impacta no desempenho produtivo. Por fim, a terceira dimensão enfatiza a importância das tecnologias colaborativas, que desempenham um papel crucial na transição da Indústria 4.0 para a Indústria 5.0.

As principais limitações deste estudo radicam na visão um pouco enviesada que o autor teve em termos de positivismo na transição à Indústria 5.0. Ou seja, não foram considerados aspectos negativos que trouxe e que continua trazendo esta transição. Particularmente para as empresas, realizar grandes investimentos em tecnologias focadas no bem-estar e satisfação dos trabalhadores pode ser prejudicial para suas finanças, dado que nem sempre esses desembolsos de dinheiro têm um retorno econômico para a empresa. No entanto, este estudo serve para que as organizações consigam ter uma maior orientação em termos de sustentabilidade social, visando que o seu modelo de negócio persista ao longo dos próximos anos, lembrando que não existem organização que sobreviva sem capital humano nas suas instalações.

Como orientações para estudos futuros, destaca-se a necessidade de realizar validações por meio de casos de aplicação real das tecnologias identificadas, permitindo obter evidências empíricas que complementem os resultados encontrados neste trabalho. Além disso, seria oportuno realizar estudos semelhantes ao presente, que identifiquem e analisem as tecnologias que evoluem na transição para uma Indústria 5.0, mas considerando os outros pilares de “sustentabilidade” e “resiliência”, que também fazem parte do tema em estudo.

Referências.

Alves, J., Lima, T. M., & Gaspar, P. D. (2023). *Is industry 5.0 a human-centred approach? a systematic review*. **Processes**, 11(1), 193.

Apraiz, A., Lasa, G., Montagna, F., Blandino, G., Triviño-Tonato, E., & Dacal-Nieto, A. (2023). *An Experimental Protocol for Human Stress Investigation in Manufacturing Contexts: Its Application in the NO-STRESS Project*. **Systems**, 11(9), 448.

Babkin, A., Shkarupeta, E., Kabasheva, I., Rudaleva, I., & Vicentiy, A. (2022). *A Framework for Digital Development of Industrial Systems in the Strategic Drift to Industry 5.0*. **International Journal of Technology**, 13(7).

Bajic, B., Suzic, N., Moraca, S., Stefanović, M., Jovicic, M., & Rikalovic, A. (2023). *Edge computing data optimization for smart quality management: Industry 5.0 perspective*. **Sustainability**, 15(7), 6032.

- Brunner, S., Siebenbürger, M., Kühnel, K., & Bengler, K. (2024). *Promoting human-centered manufacturing through Lean Ergonomics—a structural equation model for ergonomics and management data*. **Production & Manufacturing Research**, 12(1), 2398086.
- Brunzini, A., Peruzzini, M., & Barbadoro, P. (2023). *Human-centred data-driven redesign of simulation-based training: a qualitative study applied on two use cases of the healthcare and industrial domains*. **Journal of Industrial Information Integration**, 35, 100505.
- Callari, T. C., Segate, R. V., Hubbard, E. M., Daly, A., & Lohse, N. (2024). *An ethical framework for human-robot collaboration for the future people-centric manufacturing: A collaborative endeavour with European subject-matter experts in ethics*. **Technology in Society**, 78, 102680.
- Calzavara, M., Faccio, M., Granata, I., & Trevisani, A. (2024). *Achieving productivity and operator well-being: a dynamic task allocation strategy for collaborative assembly systems in Industry 5.0*. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 134(7), 3201-3216.
- Chan, H. L., & Choi, T. M. (2023). *Logistics management for the future: the IJLRA framework*. **International Journal of Logistics Research and Applications**, 1-19.
- Colabianchi, S., Costantino, F., & Sabetta, N. (2024). *Assessment of a large language model based digital intelligent assistant in assembly manufacturing*. **Computers in Industry**, 162, 104129.
- Coronado, E., Yamanobe, N., & Venture, G. (2023). *NEP+: A Human-Centered Framework for Inclusive Human-Machine Interaction Development*. **Sensors**, 23(22), 9136.
- Coronado, E., Ueshiba, T., & Ramirez-Alpizar, I. G. (2024). *A Path to Industry 5.0 Digital Twins for Human–Robot Collaboration by Bridging NEP+ and ROS*. **Robotics**, 13(2), 28.
- Cotta, W. A. A., Lopes, S. I., & Vassallo, R. F. (2023). *Towards the cognitive factory in industry 5.0: From Concept to implementation*. **Smart Cities**, 6(4), 1901-1921.
- Denyer, D., & Tranfield, D. (2009). **Producing a systematic review**.
- Dobaj, J., Riel, A., Macher, G., & Egretzberger, M. (2023). *Towards DevOps for Cyber-Physical Systems (CPSs): Resilient Self-Adaptive Software for Sustainable Human-Centric Smart CPS Facilitated by Digital Twins*. **Machines**, 11(10), 973.
- Dornelles, J. D. A., Ayala, N. F., & Frank, A. G. (2023). *Collaborative or substitutive robots? Effects on workers' skills in manufacturing activities*. **International Journal of Production Research**, 61(22), 7922-7955.
- Du Plooy, H., Tommasi, F., Furlan, A., Nenna, F., Gamberini, L., Ceschi, A., & Sartori, R. (2024). *A human-centered perspective on individual risks for digital innovation management: an integrative conceptual review*. **European Journal of Innovation Management**.
- Enrique, D. V., Marodin, G. A., Santos, F. B. C., & Frank, A. G. (2023). *Implementing industry 4.0 for flexibility, quality, and productivity improvement: technology arrangements for different purposes*. **International Journal of Production Research**, 61(20), 7001-7026.
- Erro-Garcés, A., & Aramendia-Muneta, M. E. (2023). *The role of human resource management practices on the results of digitalisation. From Industry 4.0 to Industry 5.0*. **Journal of Organizational Change Management**, 36(4), 585-602.
- European Commission, Directorate-General for Research and Innovation Breque, M., De Nul, L. and Petridis, A. (2021), **Industry 5.0 : Towards a Sustainable, Human-Centric and Resilient European**

Industry, Publications Office of the European Union, Disponível em: <https://data.europa.eu/doi/10.2777/308407>. Acesso em: 27 Set. 2024.

Fan, J., Zheng, P., & Lee, C. K. (2023). *A vision-based human digital twin modeling approach for adaptive human–robot collaboration*. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, 145(12), 121002.

Fraga-Lamas, P., Barros, D., Lopes, S. I., & Fernández-Caramés, T. M. (2022). *Mist and edge computing cyber-physical human-centered systems for industry 5.0: A cost-effective IoT thermal imaging safety system*. **Sensors**, 22(21), 8500.

Gärtner, Q., Ronco, E., Cagliano, A. C., & Reinhart, G. (2023). *Development of an approach for the holistic assessment of innovation projects in manufacturing including potential, effort, and risk using a systematic literature review and expert interviews*. **Applied Sciences**, 13(5), 3221.

Gervasi, R., Mastrogiacomo, L., & Franceschini, F. (2023). *An experimental focus on learning effect and interaction quality in human–robot collaboration*. **Production Engineering**, 17(3), 355-380.

Ghobakhloo, M., Iranmanesh, M., Morales, M. E., Nilashi, M., & Amran, A. (2023). *Actions and approaches for enabling Industry 5.0-driven sustainable industrial transformation: A strategy roadmap*. **Corporate social responsibility and environmental management**, 30(3), 1473-1494.

Górny, A. (2023). *Developing Industry 5.0 to effectively harness production capacities*. **Management Systems in Production Engineering**, 31(4), 456-463.

Gualtieri, L., Fraboni, F., Brendel, H., Pietrantoni, L., Vidoni, R., & Dallasega, P. (2024). *Updating design guidelines for cognitive ergonomics in human-centred collaborative robotics applications: An expert survey*. **Applied Ergonomics**, 117, 104246.

Hansen, A. K., Christiansen, L., & Lassen, A. H. (2024). *Technology isn't enough for Industry 4.0: on SMEs and hindrances to digital transformation*. **International Journal of Production Research**, 1-21.

Hein-Pensel, F., Winkler, H., Brückner, A., Wölke, M., Jabs, I., Mayan, I. J., ... & Zinke-Wehlmann, C. (2023). *Maturity assessment for Industry 5.0: A review of existing maturity models*. **Journal of Manufacturing Systems**, 66, 200-210.

Hermawati, S., Correa, R., Mohan, M., Lawson, G., & Houghton, R. (2024). *Defining human-centricity in Industry 5.0 and assessing the readiness of ergonomics/human factors communities in UK*. **Ergonomics**, 1-20.

Kans, M., & Campos, J. (2024). *Digital Capabilities Driving Industry 4.0 and 5.0 Transformation: Insights from an Interview Study in the Maintenance Domain*. **Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity**, 100384.

Katsampiris-Salgado, K., Dimitropoulos, N., Gkrizis, C., Michalos, G., & Makris, S. (2024). *Advancing human-robot collaboration: Predicting operator trajectories through AI and infrared imaging*. **Journal of Manufacturing Systems**, 74, 980-994.

Islam, F. B., Lee, J. M., & Kim, D. S. (2022). *Smart factory floor safety monitoring using UWB sensor*. **IET Science, Measurement & Technology**, 16(7), 412-425.

Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H. A. (2015). *A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems*. **Manufacturing letters**, 3, 18-23.

- Leng, J., Sha, W., Wang, B., Zheng, P., Zhuang, C., Liu, Q., ... & Wang, L. (2022). *Industry 5.0: Prospect and retrospect*. **Journal of Manufacturing Systems**, 65, 279-295.
- Li, S., Xie, H. L., Zheng, P., & Wang, L. (2024). *Industrial metaverse: A proactive human-robot collaboration perspective*. **Journal of Manufacturing Systems**, 76, 314-319.
- Liboni, L. B., Cezarino, L. O., Jabbour, C. J. C., Oliveira, B. G., & Stefanelli, N. O. (2019). *Smart industry and the pathways to HRM 4.0: implications for SCM*. **Supply Chain Management: An International Journal**, 24(1), 124-146.
- Lu, Y., Zheng, H., Chand, S., Xia, W., Liu, Z., Xu, X., ... & Bao, J. (2022). *Outlook on human-centric manufacturing towards Industry 5.0*. **Journal of Manufacturing Systems**, 62, 612-627.
- Martínez-Gutiérrez, A., Díez-González, J., Perez, H., & Araújo, M. (2024). *Towards industry 5.0 through metaverse*. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, 89, 102764.
- ALERNI, Matteo Meregalli; POMPONI, Vincenzo; KARIMI, Hamid Reza; NICORA, Matteo Lavit; DAO, Le Anh; MALOSIO, Matteo; ROVEDA, Loris. *A framework for human-robot collaboration enhanced by preference learning and ergonomics*. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**.
- Mourtzis, D., Angelopoulos, J., & Panopoulos, N. (2024). *Unmanned Aerial Vehicle (UAV) path planning and control assisted by Augmented Reality (AR): The case of indoor drones*. **International Journal of Production Research**, 62(9), 3361-3382.
- Nagy, L., Abonyi, J., & Ruppert, T. (2024). *Knowledge Graph-Based Framework to Support Human-Centered Collaborative Manufacturing in Industry 5.0*. **Applied Sciences**, 14(8), 3398.
- Nazarejova, J., Soltysova, Z., & Rudeichuk, T. (2024). *Requirements and Barriers for Human-Centered SMEs*. **Sensors**, 24(14), 4681.
- Neunzig, C., Möllensiep, D., Kuhlenkötter, B., & Möller, M. (2024). *ML Pro: digital assistance system for interactive machine learning in production*. **Journal of Intelligent Manufacturing**, 35(7), 3479-3499.
- Nguyen, H. N., Lasa, G., Iriarte, I., Atxa, A., Unamuno, G., & Galfarsoro, G. (2022). *Human-centered design for advanced services: A multidimensional design methodology*. **Advanced Engineering Informatics**, 53, 101720.
- Nourmohammadi, A., Ng, A. H., Fathi, M., Vollebregt, J., & Hanson, L. (2023). *Multi-objective optimization of mixed-model assembly lines incorporating musculoskeletal risks assessment using digital human modeling*. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, 47, 71-85.
- Núñez-Merino, M., Maqueira-Marín, J. M., Moyano-Fuentes, J., & Martínez-Jurado, P. J. (2020). *Information and digital technologies of Industry 4.0 and Lean supply chain management: a systematic literature review*. **International Journal of Production Research**, 58(16), 5034-5061.
- Oeij, P., Lenaerts, K., Dhondt, S., Van Dijk, W., Schartinger, D., Sorko, S., & Warhurst, C. (2024). *A Conceptual Framework for Workforce Skills for Industry 5.0: Implications for Research, Policy and Practice*. **Journal of Innovation Management**, 12(1), 205-233.
- Orso, V., Ziviani, R., Bacchiega, G., Bondani, G., Spagnolli, A., & Gamberini, L. (2022). *Employee-centric innovation: Integrating participatory design and video-analysis to foster the transition to Industry 5.0*. **Computers & Industrial Engineering**, 173, 108661.

- Özdemir, V., & Hekim, N. (2018). *Birth of industry 5.0: Making sense of big data with artificial intelligence, "the internet of things" and next-generation technology policy*. **Omics: a journal of integrative biology**, 22(1), 65-76.
- Pasparakis, A., De Vries, J., & De Koster, R. (2023). *Assessing the impact of human–robot collaborative order picking systems on warehouse workers*. **International Journal of Production Research**, 61(22), 7776-7790.
- Pereira, A. C., Alves, A. C., & Arezes, P. (2023). *Augmented Reality in a Lean Workplace at Smart Factories: A Case Study*. **Applied Sciences**, 13(16), 9120.
- Pokorni, B., Popescu, D., & Constantinescu, C. (2022). *Design of cognitive assistance systems in manual assembly based on quality function deployment*. **Applied Sciences**, 12(8), 3887.
- Rauch, E., Linder, C., & Dallasega, P. (2020). *Anthropocentric perspective of production before and within Industry 4.0*. **Computers & Industrial Engineering**, 139, 105644.
- Rescio, G., Manni, A., Caroppo, A., Ciccarelli, M., Papetti, A., & Leone, A. (2023). *Ambient and wearable system for workers' stress evaluation*. **Computers in Industry**, 148, 103905.
- Ribeiro, V. B., Nakano, D., & Muniz Jr, J. (2024). *The human resources and knowledge management integrated role in Industry 4.0/5.0: a Human-Centric Operations Management framework*. **Production**, 34, e20240014.
- Rožanec, J. M., Novalija, I., Zajec, P., Kenda, K., Tavakoli Ghinani, H., Suh, S., ... & Soldatos, J. (2023). *Human-centric artificial intelligence architecture for industry 5.0 applications*. **International journal of production research**, 61(20), 6847-6872.
- Ruiz de la Torre, A., Borregan, J., Pikatza, N., & Rio, R. M. (2024). *Integrating human-centric simulations in educational production lines: advancing ergonomics for industry 5.0 applications*. **International Journal of Production Management and Engineering**, 12(2), 141-157.
- Simeone, A., Grant, R., Ye, W., & Caggiano, A. (2023). *A human-cyber-physical system for Operator 5.0 smart risk assessment*. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 129(5), 2763-2782.
- Simeone, A., Fan, Y., Antonelli, D., Catalano, A. R., Priarone, P. C., & Settineri, L. (2024). *Inclusive manufacturing: A contribution to assembly processes with human-machine reciprocal learning*. **CIRP Annals**.
- Tomelleri, F., Sbaragli, A., Picariello, F., & Pilati, F. (2024). *Digital ergonomic assessment to enhance the physical resilience of human-centric manufacturing systems in Industry 5.0*. **Journal of Manufacturing Systems**, 77, 246-265.
- Tran, T. A., Ruppert, T., Eigner, G., & Abonyi, J. (2023). *Assessing human worker performance by pattern mining of Kinect sensor skeleton data*. **Journal of Manufacturing Systems**, 70, 538-556.
- Trstenjak, M., Gregurić, P., Janić, Ž., & Salaj, D. (2023). *Integrated Multilevel Production Planning Solution According to Industry 5.0 Principles*. **Applied Sciences**, 14(1), 160.
- Turner, C. J., & Garn, W. (2022). *Next generation DES simulation: A research agenda for human centric manufacturing systems*. **Journal of industrial information integration**, 28, 100354.
- Xu, X., Lu, Y., Vogel-Heuser, B., & Wang, L. (2021). *Industry 4.0 and Industry 5.0—Inception, conception and perception*. **Journal of manufacturing systems**, 61, 530-535.

Van Erp, T., Carvalho, N. G. P., Gerolamo, M. C., Gonçalves, R., Rytter, N. G. M., & Gladysz, B. (2024). *Industry 5.0: A new strategy framework for sustainability management and beyond*. **Journal of Cleaner Production**, 461, 142271.

Van Oudenhoven, B., Van de Calseyde, P., Basten, R., & Demerouti, E. (2023). *Predictive maintenance for industry 5.0: Behavioural inquiries from a work system perspective*. **International Journal of Production Research**, 61(22), 7846-7865.

Villani, V., Picone, M., Mamei, M., & Sabattini, L. (2024). *A Digital Twin Driven Human-Centric Ecosystem for Industry 5.0*. **IEEE Transactions on Automation Science and Engineering**.

Vukelić, Ž., Cajner, H., & Barić, G. (2024). *Research Model of the Degree of Technological Humanism in Manufacturing Companies in the Transformation towards Industry 5.0*. **Tehnički glasnik**, 18(3), 410-417.

Yasue, N., Mahmoodi, E., Zúñiga, E. R., & Fathi, M. (2025). *Analyzing resilient performance of workers with multiple disturbances in production systems*. **Applied Ergonomics**, 122, 104391.

Zhang, C., Wang, Z., Zhou, G., Chang, F., Ma, D., Jing, Y., ... & Zhao, D. (2023). *Towards new-generation human-centric smart manufacturing in Industry 5.0: A systematic review*. **Advanced Engineering Informatics**, 57, 102121.