

APRENDIZAGEM PROFISSIONAL NA INDÚSTRIA 4.0: UMA AGENDA DE PESQUISA BASEADA NA TEORIA DA ATIVIDADE

PROFESSIONAL LEARNING IN INDUSTRY 4.0: A
RESEARCH AGENDA BASED ON ACTIVITY THEORY

JOSELICE SIEBRA

jeniferhc@gmail.com

Universidade do Vale do Rio dos Sinos

0000-0002-0371-2295

AMAROLINDA KLEIN

aczanela@unisinos.br

Universidade do Vale do Rio dos Sinos

<https://orcid.org/0000-0001-8585-9057>

ROSEMARY FRANCISCO

rosemaryf@unisinos.br

Pontifícia Universidade Católica de Goiás

<https://orcid.org/0000-0001-6723-9938>

WINNIE NG PICOTO

w.picoto@iseg.ulisboa.pt

Instituto Superior de Economia e Gestão da Universidade de Lisboa

<https://orcid.org/0000-0002-9232-0858>

RESUMO

Objetivo: Este estudo tem como objetivo identificar os desafios e oportunidades para a aprendizagem profissional no contexto da Indústria 4.0, considerando as transformações no mercado de trabalho e a necessidade de adaptação das competências da força de trabalho. **Proposta:** A pesquisa propõe um *framework* teórico que contribui para compreender e orientar a aprendizagem profissional diante das exigências impostas pelas tecnologias emergentes e pelas mudanças nos ambientes de trabalho.

Abordagem teórica: O estudo fundamenta-se na Teoria da Aprendizagem Expansiva de Engeström, vinculada à Teoria da Atividade, como base para analisar e interpretar os processos de aprendizagem em contextos de mudança.

Provocação: A investigação parte do reconhecimento de uma lacuna entre as competências desenvolvidas no ensino formal e aquelas exigidas pelo mercado de trabalho, especialmente diante de tarefas que envolvem criatividade, interação social e decisões em contextos de incerteza — áreas em que a automação tem limitações.

Métodos: Foi realizada uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL), seguindo o protocolo PRISMA, com foco em publicações entre 2011 e 2025, visando mapear o estado da arte sobre aprendizagem profissional na Indústria 4.0.

Resultados: Os achados indicam a necessidade urgente de repensar programas de educação e treinamento, priorizando habilidades humanas não substituíveis pela tecnologia. Também evidenciam a importância de uma maior articulação entre empresas e instituições de ensino.

Conclusões: Conclui-se que a aprendizagem profissional na Indústria 4.0 demanda abordagens inovadoras e integradas. O *framework* proposto, baseado na Teoria da Aprendizagem Expansiva, oferece uma base analítica para repensar práticas formativas em contextos industriais em transformação.

Palavras-chave: Indústria 4.0; aprendizagem profissional; aprendizagem expansiva.

ABSTRACT

Objective: *This study aims to identify the challenges and opportunities for professional learning in the context of Industry 4.0, considering labor market transformations and the need to adapt workforce skills.*

Proposal: *The research proposes a theoretical framework to help understand and guide professional learning in response to the demands imposed by emerging technologies and changing work environments.*

Theoretical Approach: *The study is grounded in Engeström's Theory of Expansive Learning, linked to Activity Theory, as a basis for analyzing and interpreting learning processes in contexts of change.*

Provocation: *The investigation starts from the recognition of a gap between the skills developed in formal education and those required by the labor market, especially in tasks involving creativity, social interaction, and decision-making under uncertainty—areas where automation has clear limitations.*

Methods: *A Systematic Literature Review (SLR) was conducted following the PRISMA protocol, focusing on publications from 2011 to 2025, in order to map the state of the art on professional learning in Industry 4.0.*

Results: *Findings indicate an urgent need to rethink education and training programs, emphasizing human skills that cannot be easily replaced by technology. They also highlight the importance of stronger collaboration between companies and educational institutions.*

Conclusions: *The study concludes that professional learning in Industry 4.0 requires innovative and integrated approaches. The proposed framework, based on the Theory of Expansive Learning, offers an analytical foundation for rethinking educational practices in transforming industrial contexts.*

Keywords: *Industry 4.0; professional learning; expansive learning.*

1 INTRODUÇÃO

A Quarta Revolução Industrial ou Indústria 4.0 (I4.0), representa um marco significativo na trajetória da humanidade, ao promover a transição de economias rurais e primitivas para contextos altamente industrializados e digitalizados (Oyetade et al., 2025).

No entanto, a I4.0 não se trata apenas de uma revolução tecnológica, mas também uma revolução social, que exige novas habilidades e está transformando a maneira como as pessoas vivem e trabalham (Schwab e Davis, 2019; Schwab, 2016). Diversos outros autores também têm abordado como essa revolução tem impactado significativamente o trabalho e as relações de emprego (Brynjolfsson; McAfee, 2014; Frey, 2019; Ford, 2015; Susskind; Susskind, 2015).

A automatização de tarefas rotineiras e repetitivas que podem ser realizadas por máquinas inteligentes está impactando diretamente na natureza do trabalho e cada vez mais os postos de trabalho que realizam atividades simples estão desaparecendo (Arntz et al., 2016; Company;

Manyika, 2017; Frey, 2019; Frey; Osborne, 2017; Kamaruzaman et al., 2019). Dessa forma, a sociedade deve se preparar para esta transição tecnológica por meio de políticas públicas e investimentos em educação (Oyetade et al., 2025) e treinamento para novas habilidades e profissões, num contexto de elevada incerteza (WEF, 2025).

Não apenas as empresas precisam encontrar esse caminho, como também as instituições de ensino (Aubel et al., 2024), pois a literatura aponta um enorme *gap* entre as competências e habilidades desenvolvidas no âmbito do ensino formal e as competências requeridas pelo mercado de trabalho (Anshari et al., 2022; Belinski et al., 2020; Romero Gázquez et al., 2020; Schlegel; Kraus, 2023; Spöttl; Windelband, 2021; Goulart et al., 2022; Oyetade; Zuva; Harmse, 2025). Mudanças dinâmicas nos tipos de empregos necessários para a sociedade do conhecimento colocam sérios desafios aos sistemas educacionais (Aubel; Zug; Bertau, 2024; Oyetade; Zuva; Harmse, 2025) uma vez que eles estão sendo desafiados a preparar os jovens para empregos que talvez ainda nem existem (Gutiérrez-Martínez et al., 2021).

Considerando que ainda há lacunas no campo de desenvolvimento de profissionais e como ele está ocorrendo, impactado pela transformação digital da I4.0 (Anshari; Syafrudin; Fitriyani, 2022; Hernandez-de-Menendez; Escobar Díaz; Morales-Menendez, 2020; Koh; Yuen, 2022; Motyl; Filippi, 2021; Rampasso et al., 2020), são necessários estudos para verificar as tendências no referido campo a fim de que seja possível a aplicação das tecnologias digitais inteligentes nas organizações. Então, surge a seguinte questão de pesquisa deste estudo: *Quais são os desafios e oportunidades para a aprendizagem profissional no contexto da quarta revolução industrial?*

Assim, este artigo está organizado da seguinte forma: após a introdução, a segunda seção apresenta o protocolo de pesquisa para a realização da revisão da sistemática da literatura (SLR). Na seção 3 estão os resultados da análise do portfólio de artigos que compõem o estado da arte da temática discutida. A seção 4 traz a abordagem teórica selecionada para aprofundar a discussão do tema de pesquisa: a Teoria da Atividade. As análises permitiram a construção de um framework e a elaboração de proposições de pesquisa, conforme será discutido na seção 5. Por fim, a seção 6 apresenta as considerações finais deste trabalho.

2 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

2.1 Protocolo da revisão

A Revisão Sistemática da Literatura (RSL) foi aplicada a fim de compreender o estado da arte das pesquisas sobre aprendizagem profissional no contexto da I4.0. Portanto, para atingir o objetivo deste artigo, esta RSL será norteadas pelas seguintes questões:

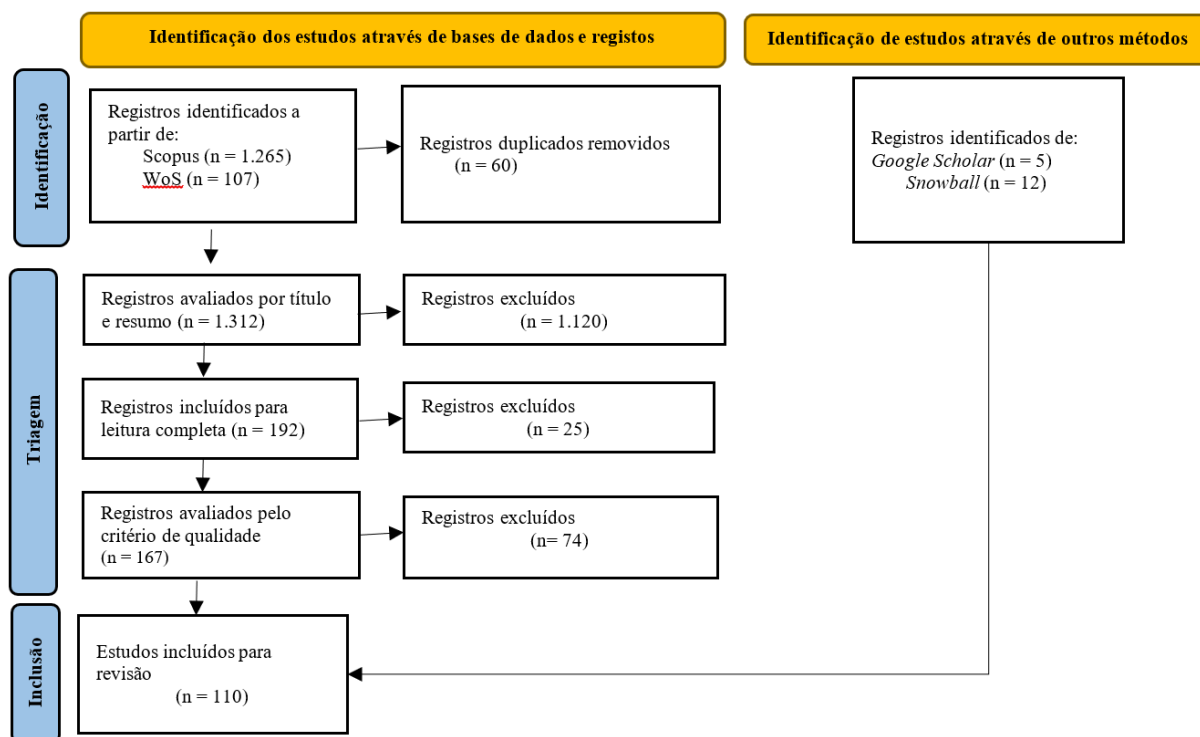
Q1: Quais são as principais competências profissionais que estão sendo desenvolvidas no contexto da I4.0?

Q2: Quais abordagens pedagógicas tem sido implementadas para o desenvolvimento de competências profissionais no contexto da I4.0?

Q3: Quais teorias da aprendizagem tem sido utilizadas para estudos sobre a aprendizagem profissional na I4.0?

Para tanto, utilizou-se o protocolo PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) (Moher et al., 2009). A Figura 1 ilustra o protocolo seguido.

Figura 1 - Etapas do Protocolo PRISMA.



Fonte: Baseado em Page et al. (2021).

Na fase 1 (Identificação) foram selecionados os artigos nas bases de dados *Scopus* e *WoS* e de outras fontes, como *Google Scholar* e a técnica de *Snowball*. A *string* utilizada na busca foi a seguinte: **((“Industr* 4.0” OR “* Industrial Revolution” OR “4IR” OR “Smart Factory” OR “Smart Industr*” OR “Digital Transformation”) AND (“Training” OR “Professional Development” OR “Professional Learning”))**, verificando a ocorrência dos termos no título, resumo ou palavras chave. Nesta fase já foram aplicados os filtros relacionados a data e ao idioma: os estudos selecionados deveriam ter sido publicados no período de 2011 (ano em que surge o conceito de Indústria 4.0) a 2025, escritos nos idiomas inglês ou português. Ainda na fase 1 foram removidos manualmente os estudos duplicados.

Na fase 2 (triagem), a partir dos artigos remanescentes foi feita uma pré-avaliação através da leitura dos resumos e da aplicação dos critérios de inclusão e exclusão. Os critérios definidos para a inclusão e exclusão dos artigos podem ser observados no Quadro 1.

Quadro 1 - Critérios de Inclusão e Exclusão dos Estudos

Critérios	Inclusão	Exclusão
C1	Os trabalhos devem tratar especificamente de processos de aprendizagem e/ou treinamentos no contexto da I4.0 envolvendo organizações de trabalho e de formação profissional.	Serão desconsiderados os trabalhos que não abordam questões relacionadas diretamente com o tema desta revisão.
C2	Devem ser trabalhos publicados e disponíveis integralmente em bases de dados científicas ou em versões impressas.	Serão desconsiderados trabalhos que não estejam disponíveis integralmente nas bases de dados pesquisadas.
C3	Os trabalhos selecionados devem possuir JCR (fator de impacto) maior ou igual a 1.5 e/ou <i>H-index</i> maior ou igual a 30.	Serão desconsiderados estudos que não possuam JCR (fator de impacto) menor que 1.5 e/ou <i>H-index</i> menor que 30.

Fonte: Elaboração própria (2025).

Após a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão, entrou-se na fase 3 (Inclusão) do protocolo. Dessa forma, foram selecionados 110 trabalhos para esta revisão. Os artigos considerados elegíveis para este estudo apresentam tópicos relevantes relacionados à aprendizagem no contexto da I4.0, permitindo que seja possível analisar suas contribuições e apontar tendências sobre o assunto em questão.

3 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

3.1 Competências profissionais na I4.0

Assim como preconizado por Schwab (2016) e corroborado por Frey; Osborne (2017), na I4.0 faz-se necessário criar programas de educação e treinamento que foquem no desenvolvimento de habilidades que não podem ser facilmente automatizadas.

As organizações devem, portanto, considerar as competências dos colaboradores como algo extremamente importante e que merece receber toda atenção e recurso, uma vez que, são essenciais para proporcionar vantagem competitiva às organizações (Jiménez López et al., 2022; Marlapudi; Lenka, 2025).

O Fórum Econômico Mundial (WEF, 2025) prevê que 170 milhões de novos empregos podem ser criados até 2030 como consequência da I4.0, contudo, isso significa também que há necessidade de uma mão de obra com habilidades técnicas, tais como, programação, bem como, habilidades não técnicas, ou seja, aquelas que não podem ser facilmente desempenhadas por computadores como, criatividade, resolução de problemas e tomada de decisão (Anshari et al., 2022; da Silva et al., 2022; Oyetade; Zuva; Harmse, 2025).

Porém, a literatura pesquisada traz que as abordagens de aprendizagem no contexto da I4.0 ainda focam muito no desenvolvimento das *hard skills*. Estas foram abordadas por 36 estudos, conforme apresentado no Quadro 2:

Quadro 2 - Principais hard skills apontada pelos estudos selecionados.

Autor	Hards skill
Angrisani et al. (2018)	Codificação, criação de IA, segurança cibernética e energia verde.
Beh et al. (2019)	Construção de estação de trabalho móvel para montagem e manutenção de produtos eletrônicos
Beh et al. (2021)	Inspeção de serviços públicos.
Bosch et al. (2022)	Digital básica
Carretero et al. (2021)	Interagir com máquinas da forma mais produtiva e segura possível.
De Las Heras et al. (2021)	Processo de conversão microbiana aeróbica em escala industrial.
Dhalmahapatra, Maiti e Krishna (2021)	Operações de guindaste EOT.
Elbestawi et al. (2017)	Fabricação, pós-processamento e comunicação de dados entre sensores e a camada superior da infraestrutura de software.
Enke et al. (2015)	Áreas fundamentais de tecnologia, pedagogia e socioeconomia.
Faller e Feldmüller (2018)	Indústria de fechaduras e chaves.
Fuertes et al. (2021)	Área da automação.
Garza et al. (2022)	Arduino.
Gorecky, Khamis e Mura, (2017)	Para indústria automotiva.
Hernández-Chávez et al. (2021)	Engenharia de sistemas automotivos.
Jiménez López et al. (2022)	Engenharia em mecatrônica.
Li et al. (2022)	Segurança e saúde ocupacional.
López et al. (2021)	Engenharia em mecatrônica.
Lou e Walker (2018)	Sistema RFID.
Karre et al. (2017)	Tecnologias habilitadoras da I4.0.
Kim, Parker e Kim (2020)	Processos de manufatura.
Paszkiwicz et al. (2022)	Circuitos digitais.
Pérez et al. (2019)	Controle de robôs industriais.
Ralph et al. (2021)	Indústria de metais.
Richard et al. (2021)	Criação de conteúdo que suporte RV e RA.
Romero-Gázquez (2022)	Setor da madeira e mobiliário.
Rosioru et al. (2022)	Para o setor de tecnologia de automação industrial.
Scaravetti e François (2021)	Para a engenharia mecânica.
Siyaev e Jo (2021)	Manutenção de aeronaves para Boeing 737.
Simons, Abé e Neser (2017)	Indústria da manufatura.
Tvenge e Ogorodnyk (2018)	Para manutenção de aeronaves.
Van Lopik et al. (2020)	Criação de conteúdo RA do usuário final (chão de fábrica).
Wang, Rizqi e Nguyen (2021)	Indústria de manufatura.

Autor	Hards skill
Wang et al. (2022)	Indústria da construção pré-fabricada.
Woschank e Pacher (2021)	Logística industrial.
Yang et al. (2018)	Criação de protótipos 3D.
Zawadzki et al. (2020)	Em tarefas de produção.

Fonte: Elaboração própria (2025).

As *soft skills* foram abordadas em apenas 15 estudos, os quais estão elencados no Quadro 3.

Quadro 3 - Principais soft skills desenvolvidas pelos estudos selecionados.

Autor	Softs skill
Alpala et al. (2022)	Colaboração.
Azevedo e Almeida (2021)	Tomada de decisão.
Bedollaa, D’antonioa e Chiabert (2017)	Trabalho em equipe.
Bühler, Jelinek e Nübel (2022)	Criatividade, empatia e destreza.
Chong et al. (2018)	proatividade e conscientização ambiental e econômica.
Erdei, Krakó e Husi (2022)	Trabalho em equipe.
Fantini, Pinzone e Taisch (2020)	Análise de tarefas e tomada de decisão.
Gutiérrez-Martínez et al. (2021)	Colaboração.
Mara, Cascón-Pereira e Brunet Icart (2022)	Trabalho em equipe.
Ourania Miliou et al. (2019)	Resolução de problemas.
Períni et al. (2017)	Colaboração e proatividade.
Saorín et al. (2019)	Colaboração.
Teng et al. (2019)	Habilidades interpessoais.
Vidal-Balea et al. (2022)	Colaboração.
Vila et al. (2017)	Colaboração e proatividade.

Fonte: Elaboração própria (2025).

Outros 20 autores desenvolveram suas pesquisas com foco tanto no desenvolvimento de *soft skills*, quanto de *hard skills* e estas estão discriminadas no Quadro 4.

Quadro 4 - Principais hard e soft skills focadas nos estudos selecionados.

Autores	Hard skills	Soft skills
Aubel; Zug; Bertau (2024)	Alfabetização digital.	Colaboração.
Cordero-Guridi et al. (2022)	Identificação de riscos e perigos potenciais no local de trabalho.	Colaboração.

Autores	Hard skills	Soft skills
De Assis Dornelles et al. (2017)	Manufatura.	Colaboração.
Jovanovic et al. (2020)	Trabalho com placas microprocessadas e sistemas em nuvem, como programação, comunicação e apresentação de dados.	Resolução de problemas e colaboração.
Kaasinen et al. (2020)	Sistemas de produção.	Tomada de decisão e trabalho em equipe.
Küsters et al. (2018)	Tecnologias de operações digitais e soluções da I4.0.	Comunicação, resolução de problemas e pensamento crítico.
Kang e Kim (2020)	Realidade virtual.	Resolução de problemas e otimização, habilidades de aprendizagem ao longo da vida e aumento da consciência sobre a comunidade e o meio ambiente.
Longo et al. (2023)	Setor petrolífero.	Tomada de decisão.
Longo, Nicoletti e Padovano (2017)	Conhecimentos teóricos e habilidades práticas sobre aquisição, processamento, visualização e interpretação de dados no contexto da I4.0.	Tomada de decisão e pensamento crítico.
Marlapudi; Lenka (2025)	Setor manufatureiro.	Competências pessoais, comportamentais e sociais
Mavrikios et al. (2011)	Setor manufatureiro.	Colaboração e tomada de decisão.
Reuter et al. (2017)	Sistemas de assistência.	Proatividade.
Roldán et al. (2019)	Transferência de conhecimento.	Desempenho e percepção.
Salah et al. (2019)	Sistema de manufatura reconfigurável.	Tomada de decisão e pensamento crítico.
Sima et al. (2020)	Engenharia e manufatura.	Resolução de problemas, comunicação e trabalho em equipe.
Tihinen, Pikkarainen e Joutsenvaara (2021)	Manufatura aditiva.	Colaboração.
Tvenge e Martinsen (2018)	Manufatura.	Criação de consciência de seu próprio processo de aprendizagem
Vilalta-Perdomo et al. (2022)	Gestão de operações.	Resolução de problemas, comunicação, colaboração e trabalho em equipe.
Wang et al. (2021)	Manufatura inteligente.	Resolução de problemas, colaboração e trabalho em equipe.
Zhang et al. (2019)	Manufatura inteligente.	Competências transversais.

Fonte: Elaboração própria (2025).

Outros autores não mencionam qual (is) habilidade(s) deseja(m) desenvolver com seus trabalhos: Amenduni et al. (2022); Barnová et al. (2022); Goglio e Bertolini (2021); Li (2022); Liu, Zha e He (2019); López, Bautista e Mantilla (2020); Koren e Klamma (2018); Nguyen et al. (2020); Rassameethes et al. (2021); Saud et al. (2018); Schallock et al. (2018); Tortorella et al. (2020); Zhukova et al. (2023).

Com relação às competências o grande desafio é identificar, mapear e desenvolver as competências necessárias para o desempenho da força de trabalho da I4.0, utilizando as tecnologias digitais (da Silva et al., 2022; Marlapudi; Lenka, 2025; Oyetade; Zuva; Harmse, 2025). Competências, especialmente *soft skills*, são aspectos diferenciadores de pessoas e máquinas em um ambiente industrial (Susskind e Susskind, 2015). Portanto, é necessário compreender sua importância nas organizações, principalmente como se pode desenvolver *soft skills* – juntamente com as *hard skills* – por meio de programas de treinamento e educação que efetivamente promovam a aprendizagem dos profissionais.

Dessa forma, faz-se necessário a construção de ambientes de aprendizagem ricos em experiências práticas e centrado no aprendiz através de abordagens e metodologias voltadas para a prática, tema que será discutido no próximo tópico.

3.2 Abordagens e metodologias de pedagógicas na I4.0

Partindo da premissa de que o processo de aprendizagem no contexto da I4.0 deve ser um processo ativo, tendo o aprendiz como elemento central e baseado na experiência, são necessárias abordagens pedagógicas focadas na prática e que aproximem a academia da indústria (Belinski et al., 2020). Assim, alguns estudos implementaram metodologias pedagógicas que possibilitaram aos aprendizes desenvolver ferramentas e estratégias para solucionar problemas e desafios semelhantes ao que poderão se deparar no campo profissional.

A fábrica de aprendizagem é a metodologia implementada com maior frequência para aprendizagem no contexto da I4.0. Estas são instalações fabris equipadas com modernas tecnologias para automação, processamento de dados em tempo real e tomada de decisão inteligente (Kim et al., 2020). Baena et al. (2017) as definem como uma instalação de fabricação física ou virtual cujo objetivo é a educação e o treinamento de uma gama de habilidades necessárias no ambiente da I4.0.

Belinski et al. (2020) destacam a criação de fábricas de aprendizagem como um elemento central que conecta academia e indústria, pois possibilitam um aprendizado ativo em ambientes de simulação bastante realistas o que pode ser observado nos trabalhos de: Baena et al. (2017); Elbestawi et al. (2018); Enke et al. (2018); Fuertes et al. (2021); Kim et al. (2020); Tvenge; Martinsen (2018); Bedolla et al. (2017).

Apesar do enorme potencial das fábricas de aprendizagem no desenvolvimento de competências e habilidades necessárias à I4.0, outras abordagens também têm sido implementadas no estudo deste tópico, conforme ilustra o Quadro 5.

Quadro 5 - Outras abordagens de aprendizagem identificadas nos estudos.

Abordagens de aprendizagem	Autores
Aprendizagem baseada em desafios	Gutiérrez-Martínez et al. (2021); Vilalta-Perdomo et al. (2022).
Aprendizagem baseada em projetos	Kang e Kim (2020); Salah et al. (2019); Simons, Abé e Naser (2017); Vila et al. (2017); Wang et al. (2021).
Aprendizagem baseada em competências	Jiménez López et al. (2022).
Aprendizagem baseada em problemas	Faller e Feldmüller (2015); Marlapudi; Lenka (2025) Ourania Miliou et al. (2022).
Aprender fazendo	Angrisani et al. (2018); Louw e Walker (2018) Rassameethes et al. (2021).
Blended learning	Bosch et al. (2022).
Learning-nuggets	Steinbuß, Holtkamp e Opiel (2017).
CDIO	Nguyen et al. (2020).
MOOC's	Goglio e Bertoloni (2021); Liu, Zah e He (2019).
Design participativo	Kaasinen et al. (2020).
Gamificação	Zhukova et al. (2023)
Serious Games	Abele et al. (2017); Longo et al. (2023); Paszkiewicz et al. (2022); Perini et al. (2017).
Simulação	Karre et al. (2017); Kumar et al. (2021); López et al. 2021); Siyaev e Jo (2021).
Gêmeo digital	Beh et al. (2022); Lopez et al. (2021); Alpala et al. (2022); Rosioru et al. (2022).
Abordagem TOP	Libone et al. (2022); Reuter et al. (2017).
Métodos mistos	Aubel; Zug; Bertau (2024); Azevedo e Almeida (2021); Bühler, Jelinek e Nübel (2022); Carretero et al. (2021); Chong et al. (2018); De Las Heras et al. (2021); Lopés, Bautista e Mantilla (2020); Mavrikios et al. (2013); Woschank e Pacher (2020); Oyetade; Zuva; Harmse (2025) Paszkiewicz et al. (2021); Prinz, Kreimeier e Kuhlenkötter (2017); Romero-Gázquez, Cañavate-Cruzado e Bueno-Delgado (2021); Schallock et al. (2018).

Fonte: Elaboração própria (2025).

Embora os autores das referências analisadas ofereçam diferentes perspectivas sobre o impacto da tecnologia na força de trabalho, todos reconhecem a necessidade de abordagens de aprendizagem que tenham o ser humano como elemento central, criando ambientes de aprendizagem personalizados e adaptados às necessidades e preferências individuais de alunos e trabalhadores, embasados em teoria da aprendizagem, tópico a ser abordado na próxima subseção.

3.3 Teorias da Aprendizagem

Apesar de existirem variadas teorias de aprendizagem, apenas 10% dos estudos selecionados para este artigo mencionam explicitamente a utilização de uma teoria como base para a construção de ambientes de aprendizagem no contexto da I4.0; são eles: Abele et al. (2017): Teoria Comportamental; Teoria Cognitivista e Aprendizagem Experiencial; Alpala et al. (2022), Elbestawi et al. (2018), Woschank; Pacher (2020ab): Teoria Construtivista; Tvenge; Ogorodnyk (2018): Aprendizagem Experiencial.

A maioria dos estudos (90%) não mencionam explicitamente nenhuma teoria de aprendizagem, no entanto, em alguns desses trabalhos é possível encontrar elementos que se alinham com a teoria construtivista, pois estes enfatizam a participação ativa dos aprendizes e a construção do conhecimento por meio da experiência e interações com a prática,

Pode-se concluir, a partir do levantamento do estado da arte, que há lacunas significativas com relação à consideração de teorias da aprendizagem no contexto da I4.0 (Marlapudi e Lenka, 2025), apesar de haver consenso quanto à necessidade de teorias da aprendizagem que consigam inspirar a criação de ambientes de aprendizagem como algo prático, a grande maioria dos trabalhos não utiliza nenhuma teoria para embasar seus estudos.

A partir da constatação do *gap* que diz respeito à baixa utilização de teorias da aprendizagem que apoiem o estudo de processos de aprendizagem no contexto da I4.0, na próxima seção será apresentada a Teoria da Atividade (TA), que, de acordo com Paavola; Hakkarainen (2005), apresenta componentes necessários para que os aprendizes aprendam algo novo nos locais de trabalho baseados na colaboração, conseguindo lidar com a complexidade das competências e tecnologias da I4.0.

Entende-se, dada as características da I4.0 e a revisão realizada até o momento, que a TA oferece elementos necessários, tais como, colaboração e construção de conhecimento, adequados a ambientes inovadores de aprendizagem e que, conforme destaca Francisco; Klein (2020), pode-se entender, à luz da TA, as contradições que surgem e precisam ser resolvidas para promover a mudança, o desenvolvimento e aprendizagem efetiva dos profissionais (Engeström, 1987; 2001).

4 BASE TEÓRICA PARA PESQUISA: TEORIA DA ATIVIDADE (TA)

A primeira geração (1978), cujo principal expoente é Vigotsky (1998), apresentou o conceito de atividade como uma ação que é mediada por um artefato e orientada para um objeto. Este conceito tornou-se a ideia central da TA (Querol et al., 2014). De acordo com o modelo, o sujeito sofre uma transformação e aprende porque ele está motivado a atingir um determinado objetivo, usando um artefato mediador.

A segunda geração da TA é baseada na contribuição de Leont'ev (1978) que evoluiu o trabalho de Vygotsky. Leont'ev (1978) propôs o conceito de ação e atividade. Ele afirma que muitas atividades só podem ser realizadas se o sujeito agir em comunidade, com suas regras e divisão de trabalho (Leont'ev, 1978; 1983).

A terceira geração da TA tem como principal expoente Engeström (2001). Ele propôs uma representação triangular expandida com base nas ideias de Leont'ev (Karanasios, 2018). Engeström (2001) aborda como elementos-chave, não uma atividade, mas sim um “sistema de atividades”. A Figura 2 mostra esta evolução da TA, assim como, suas principais características.

Figura 2 - Evolução da Teoria da Atividade



Fonte: Elaborada com base em Attaran; Attaran (2024).

Essa última geração da teoria, proposta por Engeström (1987) será discutida na próxima subseção, especialmente o conceito de aprendizagem expansiva.

4.1 Aprendizagem Expansiva

A aprendizagem expansiva, segundo Engeström; Sannino (2010) e Francisco & Klein (2020), envolve a resolução de contradições coletivas através de Zonas de Desenvolvimento Proximal (ZPD). Ela ocorre quando o indivíduo interage com a comunidade para solucionar dilemas e conflitos no trabalho. Engeström (1987) categoriza as contradições em primárias (dentro dos componentes do sistema), secundárias (entre componentes), terciárias (entre sistemas novos e antigos) e quaternárias (entre sistemas transformados e existentes). A resolução dessas contradições gera novas práticas e instrumentos. Essa abordagem sustenta a aprendizagem necessária na I4.0, destacando a colaboração e o aprendizado em contextos reais, essenciais nesse ambiente.

A partir da análise das perspectivas relacionadas à aprendizagem no contexto da I4.0 e considerando a TA, foi desenvolvido um *framework* e proposições de pesquisa, que são apresentados na próxima seção.

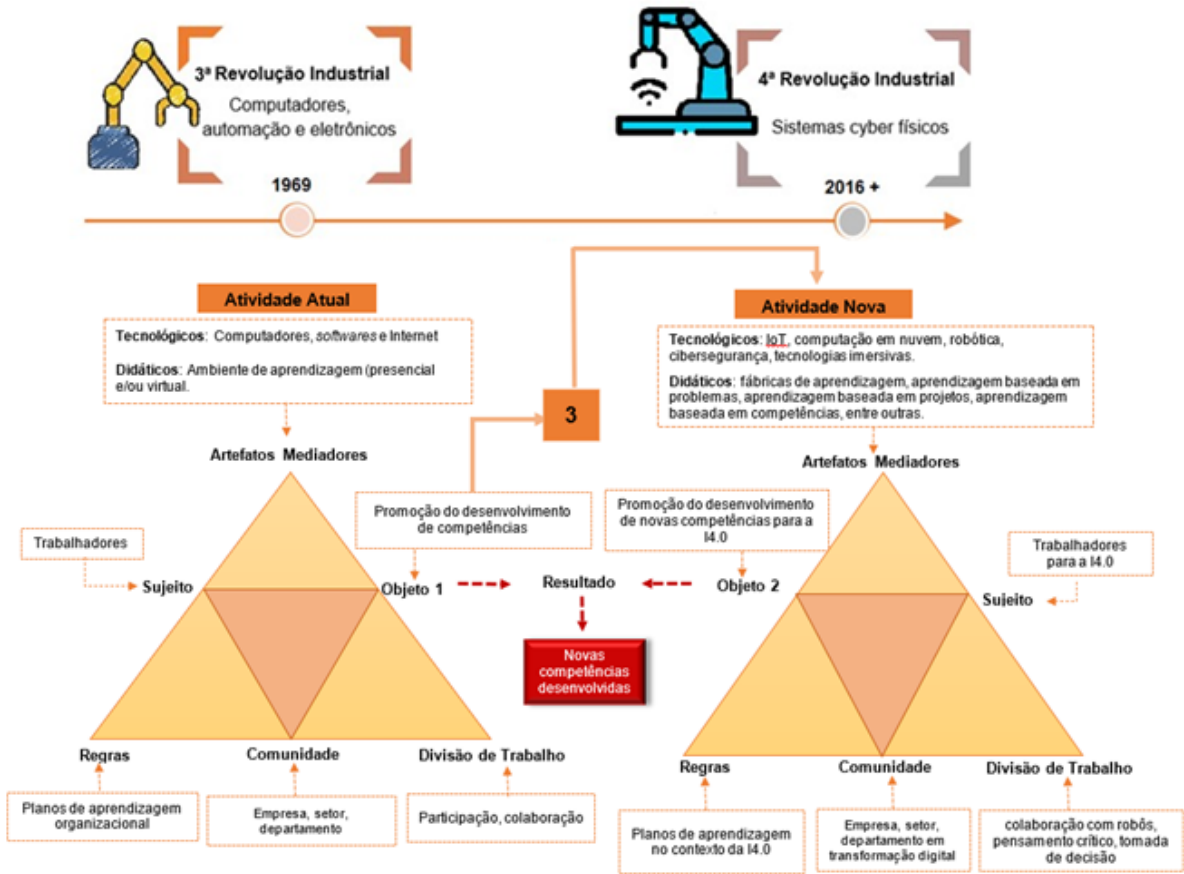
5 FRAMEWORK CONCEITUAL E PROPOSIÇÕES DE PESQUISA

A revisão sistemática da literatura permitiu identificar as principais competências exigidas na Indústria 4.0 e as abordagens pedagógicas predominantes, evidenciando lacunas no desenvolvimento integrado de *soft* e *hard skills*. Com base nesses achados, o *framework* proposto (Figura 3) fundamenta-se na Teoria da Aprendizagem Expansiva para modelar o processo de aprendizagem profissional no contexto da I4.0, articulando os elementos centrais identificados

na revisão, como o papel dos artefatos tecnológicos, a participação da comunidade e as contradições entre os sistemas de atividade antigo e novo.

Assim, o *framework* conecta o conhecimento consolidado na literatura com um modelo conceitual que orienta a compreensão e o desenvolvimento das competências necessárias para a transição tecnológica das organizações.

Figura 3 - Framework conceitual.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

O *framework* é formado por dois sistemas de atividades (atual e nova). A aprendizagem no sistema de atividade atual (anterior ao paradigma da I4.0) é formada por um sujeito (funcionário) motivado para a realização de algum objeto (desenvolvimento de competências profissionais), que usa artefatos mediadores (computadores, *softwares*, internet). Esse sujeito está inserido em uma comunidade (empresa, departamento, setor) a qual é regida por regras (planos de aprendizagem); ao mesmo tempo em que essa comunidade se relaciona com o sujeito, ela também se relaciona com o objeto, por meio da divisão do trabalho (participação, colaboração).

Contudo, este sistema irá gerar uma contradição (terceiro tipo de contradição, representado na Figura 3, pelo número 3, no quadrado) que conforme apresentado na seção anterior, é aquela contradição que ocorre entre o sistema de atividade atual e sua nova forma. Isso irá gerar o processo de aprendizagem expansiva e que resultará em novas práticas de aprendizagem (autorregulação da aprendizagem), novas formas de trabalho (por exemplo, colaboração com robôs) e novos artefatos consolidados (Tecnológicos: Inteligência Artificial, RV, RA, etc; Didáti-

cos: fábricas de aprendizagem, metodologias ativas, etc). Portanto, em um dado momento, irá ocorrer uma coexistência dos dois sistemas, representados pelos triângulos da Figura 5, uma vez que precisa haver a contradição para que aconteça a aprendizagem expansiva, neste caso, o desenvolvimento das competências profissionais necessárias no contexto da I4.0.

A TA pode ajudar a compreendermos o desenvolvimento de competências profissionais na I4.0, pois ela auxilia na observação do que está sendo transformado no contexto da atividade atual para a nova atividade.

O desenvolvimento de competências profissionais é o principal objeto do sistema de atividade para aprendizagem no contexto da I4.0. As competências são essenciais a aplicação de tecnologias avançadas e novas práticas de trabalho, o que é uma característica essencial na transformação da força de trabalho da I4.0 (Miliou et al., 2022; Rassameethes et al., 2021; Vilalta-Perdomo et al., 2022; De Araujo Junior et al., 2021; Schallock et al., 2018; Longo et al., 2023).

Para trabalhar com sistemas altamente conectados, competências sociais (*soft skills*) como habilidades interculturais, comunicação, liderança e trabalho em equipe serão essenciais (Hecklau et al., 2016). Competências, especialmente *soft skills*, são aspectos diferenciadores entre pessoas e máquinas em um ambiente industrial (Susskind e Susskind, 2015).

A questão que se coloca diz respeito à melhor cooperação possível entre humanos e máquinas (Liboni et al., 2019) nesse caso, tecnologias e máquinas “inteligentes”. Portanto, é necessário compreender a importância do desenvolvimento de competências profissionais de forma permanente, principalmente, como se pode desenvolver *soft skills* por meio de programas de aprendizagem eficientes para habilitar a força de trabalho da I4.0 para trabalhar com as tecnologias habilitadoras da I4.0. Pois, sob o prisma da TA, haverá uma mudança no papel dessas tecnologias, uma vez que haverá momentos em que elas atuarão como artefatos mediadores e outros, em que atuarão como parte da comunidade. Neste sentido, pode-se definir a primeira proposição.

Proposição 1: *O desenvolvimento de competências profissionais requer o desenvolvimento de soft skills como diferenciadores dos humanos em relação às tecnologias.*

A segunda proposição de pesquisa considera, de acordo com a lente da TA, que, para ter sucesso no alcance do objeto, o sujeito necessita desenvolver-se cognitivamente para os desafios dos novos processos de trabalho e interagir com as novas tecnologias emergentes da I4.0. Dessa forma, são necessários artefatos que promovam o desenvolvimento cognitivo dos aprendizes tornando-os protagonistas do seu processo de aprendizagem (Tvenge; Ogorodnyk, 2018; Woschank; Pacher, 2020a; Woschank; Pacher, 2020b).

É necessário considerar abordagens pedagógicas que engajem as pessoas na aprendizagem ativa e com autonomia, ao longo da vida, nessa nova realidade, em um ambiente altamente volátil e em constante mudanças, haja visto que este é um tema importante para a atualização das competências necessárias no contexto da I4.0, a fim de que seja possível promover a qualificação e requalificação constante dos trabalhadores da I4.0 (Brynjolfsson; McAfee, 2014; Cazeri et al., 2024; Schwab, 2016). Logo, apresenta-se a segunda proposição de pesquisa:

Proposição 2: *Abordagens pedagógicas baseadas em aprendizagem ativa e apoiadas por artefatos que promovam o desenvolvimento cognitivo, são essenciais para a qualificação contínua de trabalhadores da I4.0.*

Na nova atividade, segundo a TA, as tecnologias habilitadoras da I4.0 são, atualmente, os principais artefatos tecnológicos de suporte à aprendizagem no contexto da I4.0. A aplicação dessas tecnologias são a base para a transformação digital dentro das organizações (Naranjo *et al.*, 2020; Roldán *et al.*, 2019; Van Lopik *et al.*, 2020; Vidal-Balea *et al.*, 2020; Cordero-Guridi *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2022; Angrisani *et al.*, 2018; Gutiérrez-Martínez *et al.*, 2021). Contudo, apenas as tecnologias mais avançadas não são suficientes para que os sujeitos aprendam; é necessária à sua utilização conjunta com metodologias de aprendizagem que auxiliem no desenvolvimento de competências, pois a literatura aponta que já existe uma escassez de mão de obra qualificada para os novos postos de trabalho. Neste sentido, pode-se definir a terceira proposição de pesquisa:

Proposição 3: *As tecnologias habilitadoras da I4.0, quando aliadas às metodologias de aprendizagem ativa, são capazes de potencializar o desenvolvimento das competências profissionais no contexto da I4.0.*

Essas três proposições discutem os aspectos relacionados à aprendizagem profissional no contexto da I4.0. Espera-se desenvolver essas proposições empiricamente para identificar novos elementos presentes neste cenário, dimensões não observadas neste artigo e que devem ser incorporadas aos *frameworks* que nos permitem compreender melhor a aprendizagem profissional na I4.0. A partir deste artigo, serão definidas as questões e etapas metodológicas para a realização da pesquisa empírica na construção da tese de doutorado.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A I4.0 está transformando todas as áreas da vida contemporânea. Uma das áreas que sofrerá um grande impacto é o trabalho e emprego e a vasta literatura pesquisada para este ensaio mostrou que há lacunas significativa no que tange à compreensão da aprendizagem profissional no contexto da I4.0

O desenvolvimento de competências profissionais deve levar em conta: aprendizagem ativa, realizada em ambientes mais realistas, que alinhem teoria e prática através da adoção das novas tecnologias, desenvolver a inovação e a capacidade de resolução de problemas, criatividade e perspectiva sistêmica da realidade dos aprendizes, bem como sua autonomia.

Este artigo foi orientado pela seguinte questão de pesquisa: *quais são os desafios e oportunidades para a aprendizagem profissional no contexto da I4.0?* Apesar dos estudos selecionados mostrarem empenho em desenvolver alternativas para a capacitação da força de trabalho atual e futura no contexto da I4.0, chegou-se à conclusão de que ainda há um longo caminho a ser percorrido, verificou-se a necessidade da criação de espaços de aprendizagem mais escaláveis, dinâmicos e interativos, apoiados em teorias que considerem a aprendizagem ao longo da vida. A literatura sobre o tema não se esgota com esta pesquisa, contudo, extraiu-se conceitos centrais que serão utilizadas para a etapa empírica.

A contribuição deste artigo se deu especialmente pela ampliação da compreensão sobre como está ocorrendo o desenvolvimento da aprendizagem profissional no contexto da I4.0 nos últimos anos. Também é possível identificar de forma mais clara quais as competências necessárias para a transição tecnológica imposta pelas tecnologias da I4.0 e quais as tecnologias e metodologias pedagógicas usadas para alcançar esse objetivo, o que ajuda as organizações

a mapearem quais as competências que precisam desenvolver e como podem fazer de forma mais eficiente. Para os acadêmicos, este trabalho propõe um *framework* conceitual e propostas de investigação que poderão fundamentar a continuação do desenvolvimento deste tema.

As limitações deste artigo estão relacionadas ao seu caráter teórico e exploratório, baseado principalmente em uma revisão sistemática da literatura, sem a realização, ainda, de estudos empíricos para validar as proposições apresentadas. Além disso, a ausência de evidências empíricas limita a aplicação prática imediata dos resultados em ambientes organizacionais. O artigo reconhece também que a aprendizagem profissional no contexto da Indústria 4.0 é uma área complexa e em desenvolvimento, indicando que ainda há um longo percurso para estabelecer práticas efetivas de capacitação, posicionando suas conclusões como um ponto inicial para estudos posteriores.

REFERÊNCIAS

- Abele, E., Chryssolouris, G., Sihn, W., Metternich, J., ElMaraghy, H., Seliger, G., Sivard, G., ElMaraghy, W., Hummel, V., Tisch, M. & Seifermann, S. (2017a). Learning factories for future oriented research and education in manufacturing. *CIRP Annals*, 66(2), 803–826. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.05.005>
- Alpala, L. O., Quiroga-Parra, D. J., Torres, J. C. & Peluffo-Ordóñez, D. H. (2022). Smart factory using virtual reality and online multi-user: Towards a metaverse for experimental frameworks. *Applied Sciences*, 12(12), 6258.
- Amorim, M., Ferreira Dias, M., Rodrigues, M., Madureira, R., Madaleno, M., Vitória, A., Lucas, M. & Souza, A. (2019). SUSTAINING THE DIGITAL TRANSFORMATION: AN EXPLORATORY APPROACH TO PRIORITIZE COMPETENCIES FOR THE FUTURE OF WORK. *ICERI2019 Proceedings*, 1, 8555–8560. <https://doi.org/10.21125/iceri.2019.2041>
- Angrisani, L., Arpaia, P., Bonavolonta, F. & Lo Moriello, R. S. (2018). Academic FabLabs for industry 4.0: Experience at University of Naples Federico II. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 21(1), 6–13. <https://doi.org/10.1109/MIM.2018.8278802>
- Anshari, M., Syafrudin, M. & Fitriyani, N. L. (2022). Fourth Industrial Revolution between Knowledge Management and Digital Humanities. *Information*, 13(6), 292. <https://doi.org/10.3390/info13060292>
- Aranda-Jiménez, J. R., De-Pablos-heredero, C., Campos-García, I., San-Martín, J. & Cosculluela-Martínez, C. (2024). Digitalization and Industry 4.0: An Analysis of Professional Skills and Behaviours. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 17(1), 235–260. <https://doi.org/10.3926/jiem.7091>
- Arguello, J., Choi, B. & Capra, R. (2018). Factors Influencing Users' Information Requests. *ACM Transactions on Information Systems*, 36(4), 1–37. <https://doi.org/10.1145/3209624>
- Arntz, M., Gregory, T. & Zierahn, U. (2016). *The Risk of Automation for Jobs in OECD Countries: A Comparative Analysis*. <https://doi.org/10.1787/5jlz9h56dvq7-en>
- Aubel, I., Zug, S. & Bertau, M. (2024). Potential of Innovative Concepts STEM Education for Industry 4.0: CrossLab an Example. *Chemie Ingenieur Technik*, 96(11), 1455–1459. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/cite.202400114>
- Baena, F., Guarín, A., Mora, J., Sauza, J. & Retat, S. (2017). Learning Factory: The Path to Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 9, 73–80. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.022>
- Bedolla, J. S., D'Antonio, G. & Chiabert, P. (2017). A Novel Approach for Teaching IT Tools within Learning Factories. *Procedia Manufacturing*, 9, 175–181. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.049>
- Belinski, R., Peixe, A. M. M., Frederico, G. F. & Garza-Reyes, J. A. (2020). Organizational learning and Industry 4.0: findings from a systematic literature review and research agenda. *Benchmarking: An International Journal*, 27(8), 2435–2457. <https://doi.org/10.1108/BIJ-04-2020-0158>
- Brocal, F., González, C., Komljenovic, D., Katina, P. F. & Sebastián, M. A. (2019). Emerging risk management in industry 4.0: an approach to improve organizational and human performance in the complex systems. *complexity*, 2019(1), 2089763.

- Brynjolfsson, E. & McAfee, A. (2014). *The Second Machine Age Work, Progress, and Prosperity in a Time of Brilliant Technologies*.
- Carretero, M. del P., García, S., Moreno, A., Alcain, N. & Elorza, I. (2021). Methodology to create virtual reality assisted training courses within the Industry 4.0 vision. *Multimedia Tools and Applications*, 80(19), 29699–29717. <https://doi.org/10.1007/s11042-021-11195-2>
- Cassandre, M. P., Bulgacov, Y. L. M. & De Camargo, D. (2011). *O CONCEITO DE PRÁTICA A PARTIR DA PERSPECTIVA DA TEORIA DA ATIVIDADE*. https://drive.google.com/file/d/13k3z_vFgXvPrBtF20Ku1nzTHE6D9bqp7/view
- Cazeri, G. T., Santa-Eulalia, L. A., Serafim, M. P., Rampasso, I. S. & Anholon, R. (2024). Training for managers not skilled in Industry 4.0 basis: what is the most suitable content to be covered? *Technology Analysis & Strategic Management*, 36(9), 2157–2170.
- Chang, Y.-H. & Yeh, Y.-J. Y. (2018). Industry 4.0 and the need for talent: a multiple case study of Taiwan's companies. *International Journal of Product Development*, 22(4), 314–332.
- Company, M. & Manyika, J. (2017). *Technology, jobs, and the future of work*. McKinsey Insights.
- Cordero-Guridi, J. de J., Cuautle-Gutiérrez, L., Alvarez-Tamayo, R. I. & Caballero-Morales, S. O. (2022). Design and Development of a I4.0 Engineering Education Laboratory with Virtual and Digital Technologies Based on ISO/IEC TR 23842-1 Standard Guidelines. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(12). <https://doi.org/10.3390/app12125993>
- da Silva, L. B. P., Soltovski, R., Pontes, J., Treinta, F. T., Leitão, P., Mosconi, E., de Resende, L. M. M. & Yoshino, R. T. (2022). Human resources management 4.0: Literature review and trends. *Computers & Industrial Engineering*, 168, 108111. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108111>
- de Araujo Junior, C. A., Mauricio Villanueva, J. M., Almeida, R. J. S. de & de Medeiros, I. E. (2021). Digital twins of the water cooling system in a power plant based on fuzzy logic. *Sensors*, 21(20), 6737.
- Elbestawi, M., Centea, D., Singh, I. & Wanyama, T. (2018). SEPT Learning Factory for Industry 4.0 Education and Applied Research. *Procedia Manufacturing*, 23, 249–254. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.04.025>
- Engeström, Y. (1987). *Learning by Expanding: An Activity Theoretical Approach to Developmental Research*.
- Engeström, Y. (2001). Expansive Learning at Work: Toward an activity theoretical reconceptualization. *Journal of Education and Work*, 14(1), 133–156. <https://doi.org/10.1080/13639080020028747>
- Engeström, Y. & Sannino, A. (2010). Studies of expansive learning: Foundations, findings and future challenges. *Educational Research Review*, 5(1), 1–24. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2009.12.002>
- Enke, J., Glass, R., Kreß, A., Hambach, J., Tisch, M. & Metternich, J. (2018). Industrie 4.0 - Competencies for a modern production system: A curriculum for Learning Factories. *Procedia Manufacturing*, 23, 267–272. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.04.028>
- Flores, E., Xu, X. & Lu, Y. (2020). Human Capital 4.0: a workforce competence typology for Industry 4.0. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 31(4), 687–703. <https://doi.org/10.1108/JMTM-08-2019-0309>
- Ford, M. (Martin R.). (2015). *Rise of the robots: technology and the threat of a jobless future* (Basic Books).
- Francisco, R. & Klein, A. da C. Z. (2020). Understanding Collaborative Problem-Solving on the Move: A Design Science Research Journey. *BAR - Brazilian Administration Review*, 17(1). <https://doi.org/10.1590/1807-7692bar2020180145>
- Frey, C. B. (2019). *The technology trap: Capital, labor, and power in the age of automation*. Princeton University Press.
- Frey, C. B. & Osborne, M. A. (2017). The future of employment: How susceptible are jobs to computerisation? *Technological Forecasting and Social Change*, 114, 254–280. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2016.08.019>
- Fuertes, J. J., Prada, M. A., Rodriguez-Ossorio, J. R., Gonzalez-Herbon, R., Perez, D. & Dominguez, M. (2021). Environment for Education on Industry 4.0. *IEEE Access*, 9, 144395–144405. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3120517>
- Goulart, V. G., Liboni, L. B. & Cezarino, L. O. (2022). Balancing skills in the digital transformation era: The future of jobs and the role of higher education. *Industry and Higher Education*, 36(2), 118–127. <https://doi.org/10.1177/09504222211029796>
- Gutiérrez-Martínez, Y., Bustamante-Bello, R., Navarro-Tuch, S. A., López-Aguilar, A. A., Molina, A. & Álvarez-Icaza Longoria, I. (2021). A Challenge-Based Learning Experience in Industrial Engineering in the Framework of Education 4.0. *Sustainability*, 13(17), 9867. <https://doi.org/10.3390/su13179867>

- Hecklau, F., Galeitzke, M., Flachs, S. & Kohl, H. (2016). Holistic approach for human resource management in Industry 4.0. *Procedia cirp*, 54, 1–6.
- Hernandez-de-Menendez, M., Escobar Díaz, C. A. & Morales-Menendez, R. (2020). Engineering education for smart 4.0 technology: a review. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 14(3), 789–803. <https://doi.org/10.1007/s12008-020-00672-x>
- Jerman, A., Pejić Bach, M. & Aleksić, A. (2020). Transformation towards smart factory system: Examining new job profiles and competencies. *Systems Research and Behavioral Science*, 37(2), 388–402. <https://doi.org/10.1002/sres.2657>
- Jiménez López, E., Cuenca Jiménez, F., Luna Sandoval, G., Ochoa Estrella, F. J., Maciel Monteón, M. A., Muñoz, F. & Limón Leyva, P. A. (2022). Technical Considerations for the Conformation of Specific Competences in Mechatronic Engineers in the Context of Industry 4.0 and 5.0. *Processes*, 10(8), 1445. <https://doi.org/10.3390/pr10081445>
- Kaasinen, E., Schmalfuß, F., Özturk, C., Aromaa, S., Boubekur, M., Heilala, J., Heikkilä, P., Kuula, T., Liinasuo, M., Mach, S., Mehta, R., Petäjä, E. & Walter, T. (2020). Empowering and engaging industrial workers with Operator 4.0 solutions. *Computers & Industrial Engineering*, 139, 105678. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.01.052>
- Kamaruzaman, F. M., Hamid, R., Mutalib, A. A. & Rasul, M. M. (2019). *Conceptual framework for the development of 4IR skills for engineering graduates* (Vol. 21, Número 1). <https://www.researchgate.net/publication/332172338>
- Karanasios, S. (2018). Toward a unified view of technology and activity: The contribution of activity theory to information systems research. *Information Technology and People*, 31(1), 134–155. <https://doi.org/10.1108/ITP-04-2016-0074>
- Karre, H., Hammer, M., Kleindienst, M. & Ramsauer, C. (2017). Transition towards an Industry 4.0 state of the LeanLab at Graz University of Technology. *Procedia manufacturing*, 9, 206–213.
- Kim, J. W., Park, J. S. & Kim, S. K. (2020). Application of FlexSim software for developing cyber learning factory for smart factory education and training. *Multimedia Tools and Applications*, 79(23–24), 16281–16297. <https://doi.org/10.1007/s11042-019-08156-1>
- Koh, L. Y. & Yuen, K. F. (2022). Emerging competencies for logistics professionals in the digital era: A literature review. *Frontiers in Psychology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.965748>
- Kumar, V. V., Carberry, D., Beenfeldt, C., Andersson, M. P., Mansouri, S. S. & Gallucci, F. (2021). Virtual reality in chemical and biochemical engineering education and training. *Education for Chemical Engineers*, 36, 143–153. <https://doi.org/10.1016/j.ece.2021.05.002>
- Leont'ev, A. (1978). O desenvolvimento do psiquismo. Em *sobre o desenvolvimento histórico da consciência* (p. 89–142). horizonte universitário.
- Leont'ev, A. (1983). *Actividad, Conciencia y Personalidad*. Editorial Pueblo y Educacion.
- Li, C. H. J., Liang, V., Chow, Y. T. H., Ng, H.-Y. & Li, S.-P. (2022). A Mixed Reality-Based Platform towards Human-Cyber-Physical Systems with IoT Wearable Device for Occupational Safety and Health Training. *Applied Sciences*, 12(23), 12009. <https://doi.org/10.3390/app122312009>
- 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. <https://doi.org/10.1108/SCM-03-2018-0150>
- Longo, F., Padovano, A., De Felice, F., Petrillo, A. & Elbasheer, M. (2023). From “prepare for the unknown” to “train for what’s coming”: A digital twin-driven and cognitive training approach for the workforce of the future in smart factories. *Journal of Industrial Information Integration*, 32, 100437. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2023.100437>
- López, C. I., Bautista, L. E. & Mantilla, C. (2020). A novel approach to learning virtual engineering in the medical devices process. *Education and Information Technologies*, 25(6), 5703–5729. <https://doi.org/10.1007/s10639-020-10236-x>
- Marlapudi, K. & Lenka, U. (2025). Enhancing human capital for Industry 4.0: a case of Indian manufacturing sector. *Journal of Intellectual Capital*. <https://doi.org/10.1108/JIC-09-2024-0268>
- Milliou, O. (2022). The Design of a Postgraduate Vocational Training.en.pt. *International Journal of Engineering Education*, 38, . 1257-1273. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7589566>
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D. G. & others. (2009). Research methodes and reporting. *Bmj*, 8, 332–336.

- Motyl, B. & Filippi, S. (2021). Trends in engineering education for additive manufacturing in the industry 4.0 era: a systematic literature review. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 15(1), 103–106. <https://doi.org/10.1007/s12008-020-00733-1>
- Naranjo, J. E., Sanchez, D. G., Robalino-Lopez, A., Robalino-Lopez, P., Alarcon-Ortiz, A. & Garcia, M. V. (2020). A Scoping Review on Virtual Reality-Based Industrial Training. *Applied Sciences*, 10(22), 8224. <https://doi.org/10.3390/app10228224>
- Oyetade, K., Zuva, T. & Harmse, A. (2025). Integrating Industry 4.0 technologies into IT education. *Cogent Education*, 12(1). <https://doi.org/10.1080/2331186X.2025.2479195>
- Paavola, S. & Hakkarainen, K. (2005). The knowledge creation metaphor—An emergent epistemological approach to learning. *Science & education*, 14, 535–557.
- Paszkiewicz, A., Salach, M., Strzałka, D., Budzik, G., Nikodem, A., Wójcik, H. & Witek, M. (2021). VR Education Support System—A Case Study of Digital Circuits Design. *Energies*, 15(1), 277. <https://doi.org/10.3390/en15010277>
- Querol, M. A. P., Cassandre, M. P. & Bulgacov, Y. L. M. (2014). Teoria da Atividade: contribuições conceituais e metodológicas para o estudo da aprendizagem organizacional. *Gestão & Produção*, 21(2), 405–416. <https://doi.org/10.1590/0104-530X351>
- Rampasso, I. S., Mello, S. L. M., Walker, R., Simão, V. G., Araújo, R., Chagas, J., Quelhas, O. L. G. & Anholon, R. (2020). An investigation of research gaps in reported skills required for Industry 4.0 readiness of Brazilian undergraduate students. *Higher Education, Skills and Work-Based Learning*, 11(1), 34–47. <https://doi.org/10.1108/HESWBL-10-2019-0131>
- Rassameethes, B., Phusavat, K., Pastuszak, Z., Hidayanto, A. N. & Majava, J. (2021). From training to learning: Transition of a workplace for industry 4.0. *Human Systems Management*, 40(6), 777–787. <https://doi.org/10.3233/HSM-211533>
- Richard, K., Havard, V., His, J. & Baudry, D. (2021). INTERVALES: INTERActive Virtual and Augmented framework for industrial Environment and Scenarios. *Advanced Engineering Informatics*, 50. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101425>
- Roldán, J. J., Crespo, E., Martín-Barrio, A., Peña-Tapia, E. & Barrientos, A. (2019). A training system for Industry 4.0 operators in complex assemblies based on virtual reality and process mining. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 59, 305–316. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.05.004>
- Romero Gázquez, J. L., Bueno Delgado, M. V., Ortega Gras, J. J., Garrido Lova, J., Gómez Gómez, M. V. & Zbiec, M. (2020). Lack of skills, knowledge and competences in Higher Education about Industry 4.0 in the manufacturing sector. *RIED. Revista Iberoamericana de Educación a Distancia*, 24(1), 285. <https://doi.org/10.5944/ried.24.1.27548>
- Salah, B., Abidi, M. H., Mian, S. H., Krid, M., Alkhalefah, H. & Abdo, A. (2019). Virtual reality-based engineering education to enhance manufacturing sustainability in industry 4.0. *Sustainability*, 11(5), 1477.
- Scaravetti, D. & François, R. (2021). Implementation of augmented reality in a mechanical engineering training context. *Computers*, 10(12), 163.
- Schallock, B., Rybski, C., Jochem, R. & Kohl, H. (2018). Learning Factory for Industry 4.0 to provide future skills beyond technical training. *Procedia Manufacturing*, 23, 27–32. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.03.156>
- Schlegel, D. & Kraus, P. (2023). Skills and competencies for digital transformation – a critical analysis in the context of robotic process automation. *International Journal of Organizational Analysis*, 31(3), 804–822. <https://doi.org/10.1108/IJOA-04-2021-2707>
- Schwab, K. (2016). A quarta revolução industrial. *Edipro*, 1–160.
- Schwab, K. & Davis, N. (2019). *Aplicando a quarta revolução industrial*. Edipro.
- Spöttl, G. & Windelband, L. (2021). The 4th industrial revolution—its impact on vocational skills. *Journal of Education and Work*, 34(1), 29–52. <https://doi.org/10.1080/13639080.2020.1858230>
- Susskind, R. & Susskind, D. (2015). *The Future of the Professions: How Technology Will Transform the Work of Human Experts*.
- Tvenge, N. & Martinsen, K. (2018). Integration of digital learning in industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 23, 261–266. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.04.027>
- Tvenge, N. & Ogorodnyk, O. (2018). Development of evaluation tools for learning factories in manufacturing education. *Procedia Manufacturing*, 23, 33–38. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.03.157>
- Van Lopik, K., Sinclair, M., Sharpe, R., Conway, P. & West, A. (2020). Developing augmented reality capabilities for industry 4.0 small enterprises: Lessons learnt from a content authoring case study. *Computers in Industry*, 117, 103208. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103208>

- Vidal-Balea, A., Blanco-Novoa, O., Fraga-Lamas, P., Vilar-Montesinos, M. & Fernández-Caramés, T. M. (2020). Creating Collaborative Augmented Reality Experiences for Industry 4.0 Training and Assistance Applications: Performance Evaluation in the Shipyard of the Future. *Applied Sciences*, 10(24), 9073. <https://doi.org/10.3390/app10249073>
- Vigotsky, L. S. (1998). *A formação social da mente* (Martins Fontes, Org.; 6o ed).
- Vilalta-Perdomo, E., Michel-Villarreal, R. & Thierry-Aguilera, R. (2022). Integrating Industry 4.0 in Higher Education Using Challenge-Based Learning: An Intervention in Operations Management. *Education Sciences*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/educsci12100663>
- WEF, W. E. Forum. (2025). *The Future of Jobs Report*. https://reports.weforum.org/docs/WEF_Future_of_Jobs_2025_Press_Release_PTBR.pdf
- Woschank, M. & Pacher, C. (2020a). A holistic didactical approach for industrial logistics engineering education in the LOGILAB at the montanuniversitaet Leoben. *Procedia Manufacturing*, 51, 1814–1818. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.252>
- Woschank, M. & Pacher, C. (2020b). A Holistic Didactical Approach for Industrial Logistics Engineering Education in the LOGILAB at the Montanuniversitaet Leoben. *Procedia Manufacturing*, 51, 1814–1818. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.252>
- Woschank, M. & Pacher, C. (2020c). Program planning in the context of industrial logistics engineering education. *Procedia Manufacturing*, 51, 1819–1824. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.253>
- Zawadzki, P., Zywicki, K., Bun, P. & Gorski, F. (2020). Employee Training in an Intelligent Factory Using Virtual Reality. *IEEE Access*, 8, 135110–135117. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3010439>