



PROPOSIÇÃO DE UM FRAMEWORK TEÓRICO-METODOLÓGICO PARA LABORATÓRIOS VIRTUAIS DE APRENDIZAGEM IMERSIVA NA ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

PROPOSITION OF A THEORETICAL-METHODOLOGICAL FRAMEWORK FOR IMMERSIVE LEARNING VIRTUAL LABORATORIES IN PRODUCTION ENGINEERING

José Neilson de Oliveira Atanázio¹, Mariana Rodrigues de Almeida², Hélio Roberto Hekis³

DOI: 10.37702/REE2236-0158.v45p633-652.2026

RESUMO: O Ensino de Engenharia de Produção demanda abordagens inovadoras que alinhem a transformação digital à formação para a Indústria 5.0, considerando o perfil das Gerações Z e Alpha e as limitações de laboratórios físicos. Este artigo propõe o *framework* teórico-metodológico LVIPI 5.0 para a concepção e avaliação de Laboratórios Virtuais Interativos de Processos Industriais. De natureza teórico-conceitual, a metodologia envolveu uma Literatura Sistemática em Engenharia, conduzida nas bases Scopus e Web of Science, com fluxo PRISMA adaptado, que resultou em 160 referências selecionadas a partir de 3.653 identificadas; em seguida, realizou-se a estruturação conceitual e a definição de um protocolo de avaliação heurística com especialistas, no âmbito do paradigma *Design Science Research*. O *framework* integra quatro pilares: Metodologias Ativas (abordagem t-LLP), Tecnologias Imersivas, princípios da Indústria 5.0/ODS e perfil das Gerações Z/Alpha. Sua arquitetura tripartite organiza-se em seis Princípios Norteadores, três Dimensões Constitutivas com 14 variáveis operacionais e um Ciclo Metodológico de quatro etapas. A qualidade da base referencial foi atestada por quatro Índices de Qualidade Bibliográfica (IAB: 42,5%; ICE: 28,1%; ICT: 84,6%; IDM: 87,5%). A demonstração de aplicabilidade mediante um cenário pedagógico emblemático, com 91,7% de cobertura dos componentes, confirmou a capacidade do *framework* de orientar o *design* de experiências educacionais concretas. Conclui-se que o LVIPI 5.0 estabelece diretrizes viáveis para o desenvolvimento de laboratórios virtuais de nova geração, contribuindo para uma Educação em Engenharia mais alinhada às demandas contemporâneas. Sua principal limitação é a natureza teórico-propositiva, demandando validação empírica futura.

PALAVRAS-CHAVE: framework teórico-metodológico; Gerações Z e Alpha; Indústria 5.0; Laboratórios Virtuais; Metodologias Ativas.

ABSTRACT: Production Engineering education requires innovative approaches that align digital transformation with training for Industry 5.0, considering the profile of Generations Z and Alpha and the limitations of physical laboratories. This paper proposes the LVIPI 5.0 theoretical-methodological framework for the design and evaluation of Interactive Virtual Laboratories for Industrial Processes. Of a theoretical-conceptual nature, the methodology involved a Engineering Systematic Literature - conducted in Scopus and Web of Science databases, with an adapted PRISMA flow resulting in 160 references selected from 3,653 identified - followed by conceptual structuring and definition of a heuristic evaluation protocol with specialists, within the Design Science Research paradigm. The framework integrates four pillars: Active Methodologies (t-LLP approach), Immersive Technologies, Industry 5.0/SDGs principles, and the profile of Generations Z/Alpha. Its tripartite architecture organizes six Guiding Principles, three Constitutive Dimensions with 14 operational variables, and a four-stage Methodological Cycle. Reference base quality was attested by four Bibliographic Quality Indices (IAB: 42.5%; ICE: 28.1%; ICT: 84.6%; IDM: 87.5%). The demonstration of applicability through an emblematic pedagogical scenario with 91.7% coverage of framework components confirmed its capacity to guide the design of concrete educational experiences. It is concluded that LVIPI 5.0 establishes viable guidelines for the development of next-generation virtual laboratories, contributing to engineering education more aligned with contemporary demands. Its main limitation is its theoretical-propositional nature, requiring future empirical validation.

KEYWORDS: theoretical-methodological framework; Generations Z and Alpha; Industry 5.0; Virtual Laboratories; Active Learning.

¹ Mestrando em Engenharia de Produção, Engenheiro de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, jose.neilson@outlook.com.br

² Doutora em Engenharia de Produção (USP), Docente, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, almeidamariana@yahoo.com

³ Doutor em Engenharia de Produção (UFSC), Docente, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, helio.hekis@ufrn.br



INTRODUÇÃO

O Ensino de Engenharia de Produção (EdP) enfrenta o duplo desafio de acompanhar a aceleração da transformação digital e, simultaneamente, de formar profissionais aptos a liderar a transição para um paradigma industrial sustentável e centrado no ser humano. A emergente Indústria 5.0 (I5.0) amplia o escopo tecnocêntrico da Indústria 4.0 (I4.0), colocando a tecnologia a serviço da resiliência, da sustentabilidade e do bem-estar humano (Xu *et al.*, 2021; European Commission, 2021; Úrdür Broo *et al.*, 2022).

As Gerações Z (1995–2010) e Alpha (pós-2010), como nativos digitais (Prensky, 2001), consomem informação de forma não linear, valorizam interatividade, colaboração e *feedback* imediato, demonstrando menor engajamento com modelos pedagógicos tradicionais baseados em aulas expositivas (Seemiller e Grace, 2016). Suas características demandam experiências educacionais imersivas, personalizadas e gamificadas, alinhadas às Metodologias Ativas (MA) e à abordagem *Learning by Doing* (LbD) (Dewey, 1916). A Teoria da Autodeterminação (Ryan e Deci, 2000) fundamenta esse engajamento, propondo que a motivação intrínseca deriva da satisfação de três necessidades psicológicas: autonomia, competência e relacionamento, às quais as MA e os ambientes imersivos têm grande potencial para atender.

A formação prática em EdP esbarra em obstáculos significativos: custos elevados de equipamentos, manutenção especializada e obsolescência tecnológica tornam laboratórios físicos inviáveis para muitas instituições brasileiras (Brasil, 2019; Potkonjak *et al.*, 2016). As Tecnologias Imersivas (TIm), notadamente os Laboratórios Virtuais (LV), surgem como alternativa viável para superar essas barreiras (Radianti *et al.*, 2020; Jensen e Konradsen, 2018).

A análise crítica da literatura revela uma lacuna multidimensional que justifica esta pesquisa. Há abundância de simuladores orientados à I4.0, focados em eficiência e automação (Kans, Campos e Hakansson, 2020), mas escassez de *frameworks* que orientem o desenvolvimento de ambientes virtuais a partir dos princípios da I5.0 – colaboração humano-máquina, sustentabilidade socioambiental e resiliência (Longo *et al.*, 2020; European Commission, 2021). Observa-se, ainda, uma lacuna de desenho pedagógico: soluções existentes frequentemente replicam a lógica instrucionista do laboratório físico, sem incorporar sistematicamente MA e elementos de gamificação para engajar as Gerações Z e Alpha (Prince, 2004). Poucos trabalhos conectam explicitamente o



desenvolvimento de LV aos marcos normativos brasileiros e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

Diante dessa lacuna, este artigo propõe e avalia o *framework* teórico-metodológico LVIPI 5.0 para o desenvolvimento de Laboratórios Virtuais Interativos de Processos Industriais alinhados à I5.0. O problema de pesquisa é: como estruturar um *framework* teórico-metodológico para o desenvolvimento de LVIPI? O objetivo geral é propor um *framework* para a concepção e avaliação de LVIPI, alinhado aos pilares da I5.0 e adaptado ao perfil de aprendizagem das Gerações Z e Alpha. Os objetivos específicos são: (OE1) sintetizar os fundamentos da I5.0, dos ODS, da MA e das características das Gerações Z e Alpha; (OE2) identificar os componentes centrais para construção de LVIPI; (OE3) estruturar o *framework* como modelo conceitual; (OE4) demonstrar a aplicabilidade potencial do *framework* mediante um cenário pedagógico emblemático; e (OE5) discutir implicações práticas e limitações.

A contribuição distintiva desta pesquisa reside na síntese pioneira dos princípios da I5.0, das premissas das MA, das características das novas gerações e dos critérios dos ODS em uma estrutura teórico-metodológica coesa, integrando domínios tradicionalmente dissociados e alinhando-se à Agenda 2030, especialmente aos ODS 4 (Educação de Qualidade) e 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura).

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A contestação ao modelo tradicional de ensino fundamenta-se em bases teóricas consolidadas. Dewey (1916) estabeleceu o princípio do LbD, e Kolb (1984) formalizou o Ciclo de Aprendizagem Vivencial em quatro fases – Experiência Concreta, Observação Reflexiva, Conceituação Abstrata e Experimentação Ativa –, modelo que estrutura diretamente o Ciclo Metodológico do *framework* proposto. O *Problem-Based Learning* (PBL), descrito por Barrows (1996), operacionalizou esses fundamentos, com foco na investigação e na solução de problemas reais. No contexto das Revoluções I4.0 e I5.0, emerge a abordagem t-LLP (Atanázio, 2023), integrando t-LbD, t-LLL (*Technology-Enhanced Lifelong Learning*) e t-PBL – uma estrutura metodológica que articula ação, resolução de problemas e aprendizagem contínua em ambientes tecnologicamente mediados, constituindo o pilar pedagógico central do LVIPI 5.0.



O marco conceitual das TIm foi estabelecido por Milgram e Kishino (1994) com o *Virtualidade Continuum*. Sua efetividade pedagógica ancora-se na Teoria da Aprendizagem Experiencial de Kolb (1984), facilitando a compreensão de conceitos complexos ao transformar abstrações em experiências concretas (Dalgarno e Lee, 2010). Os LV evoluíram de réplicas digitais para ambientes sofisticados que operacionalizam MA como PBL e LbD (Potkonjak *et al.*, 2016; Radianti *et al.*, 2020). A avaliação desses ambientes exige uma abordagem que transcenda os critérios tradicionais de usabilidade: o *framework* propõe uma Avaliação Heurística Adaptada, expandindo a proposta de Nielsen (1994) para três dimensões – usabilidade técnica, qualidade pedagógica e alinhamento à I5.0 e à sustentabilidade (Squires e Preece, 1999; Sutcliffe, 2001).

A I5.0 representa uma evolução do paradigma tecnocêntrico da I4.0, colocando a tecnologia a serviço da centralidade humana, da sustentabilidade e da resiliência (Xu *et al.*, 2021; European Commission, 2021) e incorporando *trade-offs* sociotécnicos como elemento constitutivo das decisões de produção (Rajesh, 2021; Longo *et al.*, 2020). Esse alinhamento encontra suporte nos ODS 4 (Educação de Qualidade) e 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura), posicionando o *framework* na interseção entre a I5.0 e a Agenda 2030.

As Gerações Z e Alpha, como nativos digitais (Prensky, 2001), valorizam interatividade, *feedback* imediato e recursos multimodais (Tapscott, 2009; Seemiller e Grace, 2016; Mayer, 2009). A Teoria da Autodeterminação (Ryan e Deci, 2000) fundamenta seu engajamento, propondo que a motivação intrínseca deriva da satisfação das necessidades de autonomia, competência e relacionamento – necessidades que as MA e os ambientes imersivos têm potencial para satisfazer e que estruturam diretamente os Princípios de *Design* de Experiência do LVIPI 5.0. Evidências empíricas confirmam que as MA reduzem a reprovação e elevam o desempenho nesse público (Freeman *et al.*, 2014).

A gamificação – uso de elementos de *design* de jogos em contextos não lúdicos (Deterding *et al.*, 2011) – constitui uma estratégia pedagogicamente fundamentada para engajar essas gerações. A estrutura MDA (Hunicke, LeBlanc e Zubek, 2004) fornece o modelo conceitual para o *design* de experiências gamificadas, com *Mechanics*, *Dynamics* e *Aesthetics* operacionalizados por Kapp (2012), Schell (2019) e Otto e Hickey (2014) em contextos educacionais, fundamentando diretamente a Dimensão de Gamificação e Engajamento do *framework*.



METODOLOGIA

A pesquisa é de natureza teórico-conceitual e descritiva, seguindo um ciclo de síntese, estruturação e avaliação crítica para o desenvolvimento de *frameworks* teóricos (Jabareen, 2009; Macinnis, 2011). O paradigma geral adotado é o *Design Science Research* (DSR) (Hevner *et al.*, 2004; Peffers *et al.*, 2007), que orienta a construção do artefato conceitual e confere rigor ao processo de desenvolvimento. Dentro do Ciclo de Rigor do DSR, a seleção e a análise do referencial teórico foram conduzidas por meio da técnica de Literatura Sistemática em Engenharia (ESL), abordagem adaptada das revisões sistemáticas tradicionais, com foco em sínteses conceituais para a construção de *frameworks* em Engenharia e tecnologia educacional (Webster e Watson, 2002; vom Brocke *et al.*, 2009; Paré *et al.*, 2015). A ESL constitui, portanto, o mecanismo de fundamentação do Ciclo de Rigor do DSR, e não uma etapa do ciclo de *design* em si.

A ESL foi realizada simultaneamente nas bases *Scopus* e *Web of Science* (WoS), com fluxo adaptado das diretrizes PRISMA 2020 (Page *et al.*, 2021), assegurando transparência e replicabilidade. O processo seguiu cinco etapas sequenciais.

- i) Etapa 1 – Definição do escopo: quatro pilares temáticos – Metodologias Ativas, Tecnologias Imersivas, Indústria 5.0 e Perfil das Gerações Z e Alpha – estruturaram quatro *strings* de busca temáticas.
- ii) Etapa 2 – Busca sistemática: a busca resultou em 1.108 registros na *Scopus* e 2.545 na WoS, totalizando 3.653 registros iniciais.
- iii) Etapa 3 – Triagem e seleção: filtros progressivos foram aplicados por período (2015-2025), idioma (inglês), tipo de documento (artigos científicos), área temática (Engenharia) e critério ético de Acesso Aberto, em observância aos princípios da Ciência Aberta. Após deduplicação entre bases (sobreposição estimada em ~40%, conforme Gusenbauer e Haddaway, 2020), obteve-se um *corpus* de 1.287 documentos únicos. A leitura de títulos e resumos selecionou 400 artigos; a leitura integral dos textos, avaliada por critérios de qualidade metodológica e contribuição conceitual, reduziu esse número para 120 artigos.
- iv) Etapa 4 – Complementação estratégica: a técnica de *snowballing* e a busca manual no *Google Books* e em bases especializadas (IEEE, ERIC entre outras) adicionaram 40 publicações, totalizando 160 referências na síntese final, com taxa de retenção global de 4,4% (160/3.653) e 100% em Acesso Aberto.
- v) Etapa 5 – Extração, classificação e síntese conceitual: as 160 referências foram classificadas segundo três Critérios de Inclusão (CI) alinhados às fases



do DSR: CI01 – Design e Desenvolvimento do Artefato (78 trabalhos; 48,8%); CI02 – Avaliação e Validação (33 trabalhos; 20,6%); CI03 – Revisão e Contextualização (85 trabalhos; 53,1%). A proporção de referências classificadas em múltiplos critérios (62; 38,8%) evidencia a elevada interdisciplinaridade da base. Os percentuais não somam 100% em razão da possibilidade de classificação múltipla.

É importante esclarecer que os critérios CI01, CI02 e CI03 são instrumentos de classificação bibliográfica das referências dentro da lógica do DSR e não etapas do método de revisão em si. A revisão foi conduzida pela ESL; o DSR orienta o paradigma geral da pesquisa e a estrutura de desenvolvimento do artefato.

Para avaliar a qualidade substantiva da base referencial, foram desenvolvidos e aplicados quatro Índices de Qualidade Bibliográfica, calculados sobre as 160 referências finais e fundamentados em Webster e Watson (2002), vom Brocke *et al.* (2009) e Paré *et al.* (2015): IAB (Índice de Atualidade Bibliográfica): 42,5% – 68 trabalhos publicados a partir de 2020; ICE (Índice de Cobertura Emergente): 28,1% – 45 trabalhos abordando temas de fronteira (IA, Metaverso, I5.0); ICT (Índice de Convergência Tecnológica): 84,6% – 66 dos 78 trabalhos de CI01 com aplicação educacional explícita; IDM (Índice de Diversidade Metodológica): 87,5% – 7 das 8 categorias metodológicas identificadas estão representadas.

Com base na síntese da literatura, o *framework* foi desenvolvido em três etapas sequenciais: (i) Síntese dos Pilares Fundamentais – identificação e integração dos quatro pilares conceituais a partir da análise das 160 referências; (ii) Estruturação e Integração Conceitual – inter-relação dos pilares, definição dos componentes centrais e elaboração do modelo conceitual tripartite; (iii) Definição das Métricas de Avaliação – estabelecimento de diretrizes para avaliação futura, derivadas de uma Avaliação Heurística Adaptada que expande as heurísticas de Nielsen (1994) para três dimensões inter-relacionadas: usabilidade técnica, qualidade pedagógica e alinhamento à I5.0 e à sustentabilidade.

Para avaliar a consistência e a aplicabilidade potencial do *framework*, foram adotadas duas estratégias complementares de avaliação *ex ante* (Venable, Pries-Heje e Baskerville, 2016), coerentes com o escopo teórico-propositivo da pesquisa e com o posicionamento do artefato como *Nascent Design Theory* – Nível 2 na taxonomia de Gregor e Zwikael (2024). A primeira estratégia, executada no âmbito deste artigo, consiste na demonstração de aplicabilidade por meio de um cenário pedagógico emblemático: operacionalização completa do *framework* em um cenário representativo dos dilemas da I5.0, com mapeamento sistemático da



cobertura de cada componente do modelo. A segunda estratégia consiste na avaliação heurística por um painel de cinco a sete especialistas, selecionados por amostragem intencional (Patton, 2015) com *expertise* em pelo menos um dos pilares do *framework* – Educação em Engenharia e Metodologias Ativas; Tecnologias Educacionais e Ambientes Imersivos; Indústria 4.0/5.0 e Sustentabilidade. O protocolo completo, incluindo o perfil dos avaliadores, o instrumento de coleta estruturado com perguntas abertas e o procedimento de Análise de Conteúdo Temática (Bardin, 2011), encontra-se desenvolvido e documentado na dissertação de mestrado que deu origem a este artigo (Atanázio, 2025). Sua execução constitui a continuidade imediata da pesquisa: o presente artigo reporta os resultados da primeira estratégia e apresenta o protocolo da segunda, cuja aplicação é objeto de publicação subsequente. Essa sequência é metodologicamente coerente com a avaliação *ex ante* em estágios progressivos, conforme preconizado por Venable, Pries-Heje e Baskerville (2016) e Hevner *et al.* (2004).

O FRAMEWORK LVIPI 5.0

O *framework* LVIPI 5.0 é produto da síntese conceitual fundamentada na análise sistemática de 160 publicações, realizada por meio da técnica ESL. Sua arquitetura organiza-se em três camadas hierárquicas e interdependentes: (i) Princípios Norteadores – fundação filosófica e pedagógica que orienta todas as escolhas de *design*; (ii) Dimensões Constitutivas – componentes operacionais que materializam os princípios em elementos concretos de interface e funcionalidade; e (iii) Ciclo Metodológico – jornada de Aprendizagem Experiencial que articula as dimensões em uma sequência pedagógica fundamentada em Kolb (1984).

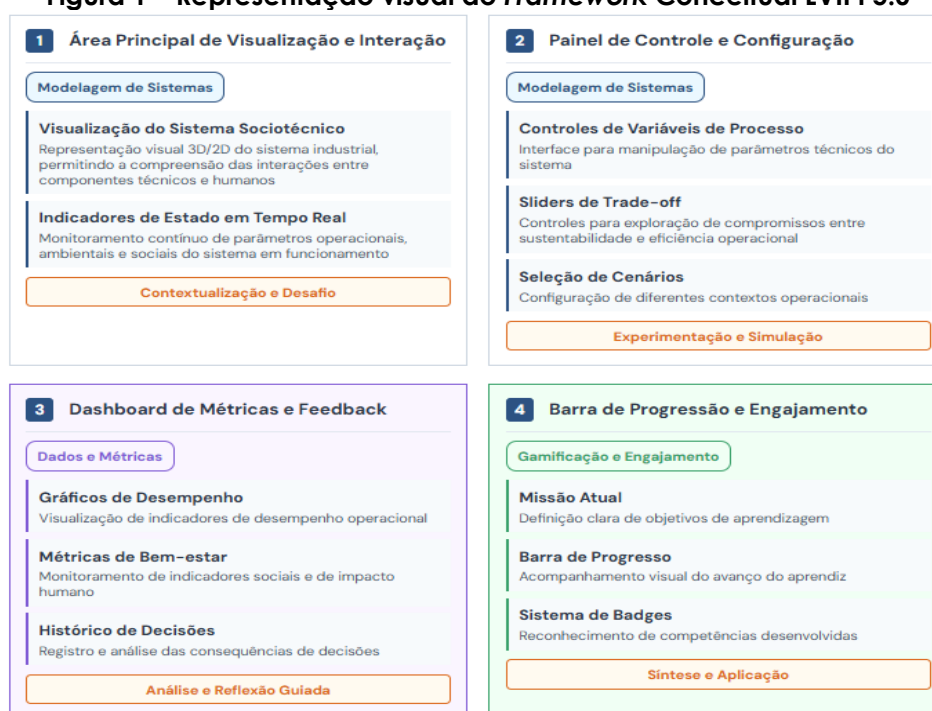
Os seis Princípios Norteadores constituem a fundação filosófica e pedagógica do *framework* e estão organizados em duas categorias. Os Princípios Pedagógicos são: P1 –Aprendizagem Baseada em Problemas Complexos, que orienta o uso de cenários autênticos da I5.0 para promover análise crítica e tomada de decisão contextualizada (Barrows, 1996; Erol *et al.*, 2016); P2 – Centralidade nos Pilares da I5.0 e ODS, que posiciona a sustentabilidade, a resiliência e o bem-estar humano como elementos constitutivos da experiência, exigindo que o aprendiz negocie *trade-offs* entre eficiência, impacto ambiental e fatores humanos (Xu *et al.*, 2021; Rajesh, 2021); e P3 – *Feedback* Iterativo para Aprendizagem Reflexiva, que orienta mecanismos de *feedback* contínuo, fomentando a reflexão sobre causalidade e a



iteração de estratégias (Kolb, 1984; Schön, 1983). Os Princípios de *Design* de Experiência são: P4 – Clareza e Foco na Ação, priorizando uma hierarquia visual clara e minimizando a carga cognitiva extrínseca (Shneiderman, 1998; Norman, 2013); P5 – Agência e Personalização do Aprendiz, prevendo a tomada de decisões significativas e atendendo às expectativas de autonomia das Gerações Z e Alpha (Ryan e Deci, 2000; Seemiller e Grace, 2016); e P6 – Acessibilidade e Equidade, assegurando acesso equitativo a alunos com diferentes habilidades (UNESCO, 2017; Brasil, 2019).

As três Dimensões Constitutivas operacionalizam os princípios em 14 variáveis funcionais com rastreabilidade teórica completa. A Figura 1 representa visualmente essa arquitetura, organizada em quatro quadrantes funcionais: à esquerda, a Área Principal de Visualização e Interação e o *Dashboard* de Métricas e Feedback, que sustentam, respectivamente, as Dimensões 1 e 3; à direita, o Painel de Controle e Configuração e a Barra de Progressão e Engajamento, que operacionalizam as Dimensões 1 e 2. A leitura integrada dos quadrantes revela a lógica do *framework*: o aprendiz visualiza o sistema sociotécnico (quadrante superior esquerdo), manipula suas variáveis (quadrante superior direito), acompanha os resultados por meio de métricas (quadrante inferior esquerdo) e recebe retorno gamificado sobre seu progresso (quadrante inferior direito).

Figura 1 – Representação visual do Framework Conceitual LVIPI 5.0



Fonte: elaborada pelos autores (2025).



Cada quadrante da Figura 1 corresponde a um agrupamento funcional de variáveis que será detalhado a seguir. A codificação por cores distingue os elementos pertencentes à Modelagem de Sistemas (azul), à Contextualização e Desafio (azul), à Experimentação e Simulação (azul), à Análise e Reflexão Guiada (roxo) e à Síntese e Aplicação (verde), evidenciando a rastreabilidade entre componentes visuais e as dimensões conceituais do *framework*.

A Dimensão 1 – Modelagem de Sistemas Sociotécnicos (4 variáveis) define os elementos para a representação integrada de um sistema produtivo, incorporando variáveis técnicas (fluxos de materiais, tempos de ciclo), de sustentabilidade (consumo energético, emissões de CO₂) e relacionadas aos fatores humanos (indicadores ergonômicos, bem-estar do operador). Suas variáveis – Visualização do Sistema Sociotécnico (Shneiderman, 1997; Card, Mackinlay e Shneiderman, 1999), Indicadores de Estado em Tempo Real (Marcon *et al.*, 2021; Hjelle *et al.*, 2024), Controle de Variáveis de Processo (Banks *et al.*, 2010) e Cenários de Contexto (Erol *et al.*, 2016) – fornecem ao aprendiz o ambiente interativo no qual toda a experimentação ocorre.

A Dimensão 2 – Gamificação e Engajamento (7 variáveis) é baseada na estrutura MDA (Hunicke, LeBlanc e Zubek, 2004) e organiza-se em torno do Painel de Controle integrador (Garrett, 2010; Norman, 2013), que consolida os controles de simulação – incluindo os *sliders* de *trade-off* (Rajesh, 2021), centrais para a exploração de compensações entre sustentabilidade, desempenho e resiliência – e os elementos de engajamento: Missão/Objetivo Claro, Barra de Progresso (Deterding *et al.*, 2011), Sistema de *Badges* (Otto e Hickey, 2014; Zichermann e Cunningham, 2011) e Elementos de *Game Design* (Kapp, 2012; Schell, 2019).

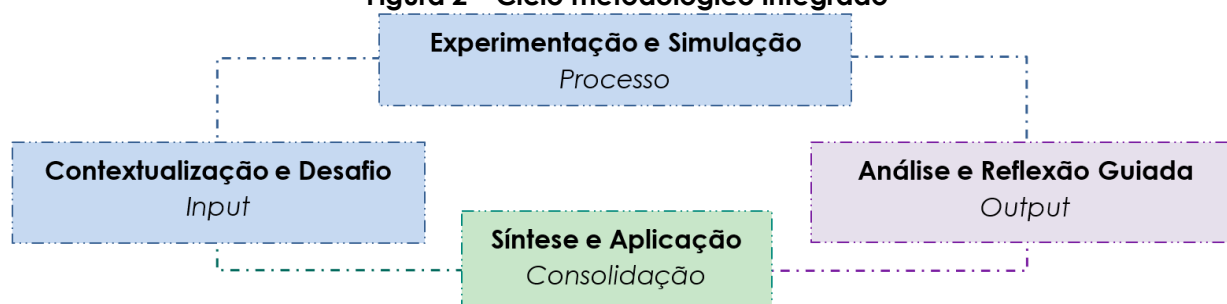
A Dimensão 3 – Dados e Métricas para Análise (3 variáveis) torna visíveis as consequências das decisões do aprendiz por meio de Gráficos de Desempenho Operacional (Knaflitz, 2015; Hjelle *et al.*, 2024), Métricas de Bem-Estar Social/Humano (Squires e Preece, 1999) – que previnem uma visão puramente tecnocrática e alinham o ambiente ao pilar Centrado no Humano da I5.0 – e Histórico de Decisões (Ericsson e Simon, 1993), que suporta a aprendizagem autorregulada por meio da análise retrospectiva da cadeia decisória.

A convergência interdisciplinar resultante – seis domínios do conhecimento, 28 autores fundantes e 64% das variáveis com fundamentação múltipla – não é acidental, mas produto sistemático da análise das 160 referências conduzida pela ESL.

O Ciclo Metodológico Integrado constitui o cerne operacional do *framework*, composto por quatro etapas iterativas que materializam a Aprendizagem

Experiencial de Kolb (1984) e a abordagem LbD. A Figura 2 representa esse ciclo em sua lógica não linear: as etapas não se sucedem em sentido único, mas em um fluxo bidirecional que permite retornos e iterações. A posição central vazia no diagrama é intencional, representa o espaço de decisão do aprendiz, para onde convergem todas as etapas e de onde partem os ciclos de refinamento.

Figura 2 – Ciclo metodológico integrado



Fonte: elaborada pelos autores (2025).

Lendo o diagrama no sentido horário, a partir da esquerda: Contextualização e Desafio (*Input*) fornece o ponto de partida problemático; Experimentação e Simulação (*Processo*) é o momento de ação sobre o ambiente; Análise e Reflexão Guiada (*Output*) converte a experiência em aprendizagem explícita; e Síntese e Aplicação (*Consolidação*) fecha o ciclo, transferindo o conhecimento para novos contextos. As setas bidirecionais indicam que o aprendiz pode retornar a etapas anteriores – característica que diferencia este ciclo de sequências lineares instrucionistas. Cada etapa é detalhada a seguir:

- i) C1 – Contextualização e Desafio (*Input*): o aprendiz é imerso em um cenário problemático autêntico, elaborado para refletir os dilemas sociotécnicos da I5.0, operacionalizando o princípio P1 e a fase de Experiência Concreta de Kolb (1984).
- ii) C2 – Experimentação e Simulação (*Processo*): o aprendiz interage com o ambiente que implementa as Dimensões Constitutivas, testando configurações e observando resultados em um ambiente de risco zero – materialização do LbD (Dewey, 1938) e da Experimentação Ativa de Kolb (1984).
- iii) C3 – Análise e Reflexão Guiada (*Output*): o aprendiz é guiado na análise crítica dos resultados utilizando as métricas definidas na Dimensão 3. Questões reflexivas articulam o conhecimento prático com os fundamentos teóricos, operacionalizando a Observação Reflexiva de Kolb (1984) e a Análise de Protocolo de Ericsson e Simon (1993).
- iv) C4 – Síntese e Aplicação (*Consolidação*): o aprendiz formula princípios gerais extraídos da experiência e os transfere para novos contextos, fechando o ciclo com



a Conceituação Abstrata de Kolb (1984) e o conceito de profissional reflexivo de Schön (1983). Aprendizes que demonstram equilíbrio na pontuação e articulam princípios coerentes recebem o *Badge* correspondente, certificando a competência desenvolvida (Otto e Hickey, 2014).

O *framework* responde às lacunas identificadas na literatura de forma estruturada: à lacuna técnico-pedagógica, responde com a sólida fundamentação em MA e LbD de seus Princípios e Ciclo Metodológico; à lacuna de abrangência sociotécnica, responde com a Dimensão de Modelagem, que incorpora *trade-offs* como elementos centrais; à lacuna de personalização e engajamento geracional, responde com os Princípios de *Design* de Experiência e a Dimensão de Gamificação.

Para orientar a implementação prática, o *framework* estabelece três diretrizes operacionais. A Diretriz A – Definição do Cenário com *Trade-off* Sociotécnico orienta a identificação de um dilema autêntico da I5.0 com conflito entre pelo menos duas dimensões (ex.: eficiência produtiva *versus* bem-estar humano) e a parametrização desse dilema em variáveis quantificáveis e manipuláveis, modelando relações não lineares entre elas (Erol *et al.*, 2016; Rajesh, 2021). A Diretriz B – Configuração da Camada de Gamificação orienta a definição das *Mechanics* (*sliders* de *trade-off*, sistema de pontuação baseado em equilíbrio, *badges* por competência), o *design* das *Dynamics* (exploração e tomada de decisão ponderada com *feedback* imediato) e as *Aesthetics* almejadas (sensação de desafio e descoberta, satisfazendo as necessidades de autonomia e competência – Ryan e Deci, 2000) (Hunicke, LeBlanc e Zubek, 2004; Deterding *et al.*, 2011; Kapp, 2012). A Diretriz C – Implementação do *Dashboard* de Métricas orienta a apresentação simultânea de indicadores de todas as dimensões do *trade-off* (técnica, humana, ambiental), a inclusão de um Histórico de Decisões para análise retrospectiva da trajetória de escolhas e a adoção de princípios de visualização eficaz (Knaflitz, 2015).

O *framework* foi projetado com arquitetura modular e agnóstica em relação a uma plataforma específica: pode ser implementado desde ambientes WebXR de baixa barreira até experiências de VR *full-immersion* de alta fidelidade, mantendo-se os Princípios Norteadores invariantes e adaptando-se os componentes das Dimensões Constitutivas ao contexto institucional.



RESULTADOS E DISCUSSÃO

A aplicação da técnica ESL resultou em uma base referencial com qualidade substantiva comprovada em múltiplas dimensões. A distribuição evidencia uma cobertura equilibrada das três fases do DSR, com predominância de trabalhos focados em *design* (48,8%) e contextualização (53,1%), refletindo a natureza teórico-propositiva da pesquisa. A proporção significativa de referências que atendem a múltiplos critérios (38,8%) indica uma interdisciplinaridade metodológica essencial para a construção de um *framework* integrado. A Tabela 1 apresenta os Índices de Qualidade Bibliográfica calculados sobre a base final.

Tabela 1 – Índices de qualidade da base bibliográfica

Critério	Percentual	Foco
IAB	42,5%	68 trabalhos publicados a partir de 2020, assegurando relevância temporal frente à rápida evolução das TIm e da I5.0.
ICE	28,1%	45 trabalhos abordando temas de fronteira (IA, Metaverso, I5.0), demonstrando aderência a tendências contemporâneas.
ICT	84,6%	66 dos 78 trabalhos de CI01 possuem aplicação educacional explícita, assegurando contextualização pedagógica das tecnologias.
IDM	87,5%	7 das 8 categorias metodológicas identificadas representadas, prevenindo vies metodológico.

Fonte: elaborada pelos autores (2025).

Os índices demonstram que a base referencial não apenas possui volume adequado, mas também apresenta qualidade substantiva em múltiplas dimensões: atualidade temporal, abrangência temática, relevância prática e rigor metodológico. Em resposta à crítica sobre a atualização do referencial, ressalta-se que 42,5% das obras foram publicadas a partir de 2020, com 28,1% cobrindo especificamente temas emergentes como IA, Metaverso e I5.0 – domínios inexistentes ou incipientes há dez anos. A presença de obras seminais anteriores a esse período é metodologicamente justificada: fundamentos como a Aprendizagem Experiencial de Kolb (1984), o LbD de Dewey (1916) e a Teoria da Autodeterminação de Ryan e Deci (2000) constituem bases teóricas consolidadas, cuja substituição por versões mais recentes não seria metodologicamente adequada.

A fundamentação conceitual do LVIPI 5.0 é evidenciada por sua arquitetura tripartite – seis Princípios Norteadores, três Dimensões Constitutivas com 14 variáveis operacionais e um Ciclo Metodológico de quatro etapas – ancorada em 28 autores fundantes distribuídos em seis domínios do conhecimento: Educação e Aprendizagem Experiencial, Interação Humano-Computador, Simulação e



Modelagem Computacional, Gamificação e *Design* de Jogos, Avaliação de *Software* Educacional, e Indústria 4.0/5.0.

A coerência sistêmica manifesta-se em dois padrões de interdependência funcional. O Padrão de Cascata Operacional demonstra que uma decisão do usuário percorre múltiplas dimensões: os *Sliders* de *Trade-off* (Variável 2.2), ancorados em Rajesh (2021), alimentam os Gráficos de Desempenho (Variável 3.1), baseados em Knaflitz (2015) e Hjelle *et al.* (2024), que, por sua vez, suportam a Análise e Reflexão Guiada (Ciclo 3), ancorada em Kolb (1984) e Ericsson e Simon (1993). O Padrão de Transversalidade Axiológica demonstra que o Princípio P2 – Centralidade nos Pilares da I5.0 e ODS – permeia simultaneamente os *Sliders* de *Trade-off* (2.2), as Métricas de Bem-Estar (3.2) e os Indicadores de Estado em Tempo Real (1.2), evidenciando que os valores da I5.0 não são decorativos, mas estruturantes do artefato.

Comparado a *frameworks* correlatos, o LVIPI 5.0 apresenta avanços distintivos: rastreabilidade teórica completa, com 28 autores fundantes e 64% das variáveis com fundamentação múltipla, ausente em Gardner e Elliott (2014) e Freina e Ott (2015); centralidade dos princípios da I5.0, inexistente em *frameworks* orientados à I4.0 (Kans, Campos e Hakansson, 2020); atenção explícita ao perfil geracional das Gerações Z e Alpha; e estrutura tripartite que diferencia fundamentos, operação e fluxo de aprendizagem – características ausentes no *framework* MDA de Hunicke, LeBlanc e Zubek (2004) e no TPACK de Mishra e Koehler (2006).

Para avaliar a aplicabilidade potencial do *framework* antes da validação empírica com usuários finais, desenvolveu-se o Cenário 1: Otimização de Linha de Montagem – *Trade-off* entre Eficiência e Bem-Estar, representativo do pilar Centrado no Humano da I5.0.

O aprendiz assume o papel de Engenheiro de Produção que precisa aumentar 20% da produção em duas semanas, enfrentando simultaneamente crescentes queixas de operadores sobre fadiga e risco de Distúrbios Osteomusculares Relacionados ao Trabalho (DORT). A missão é otimizar a linha sem comprometer o bem-estar humano, operacionalizando o dilema da I5.0 descrito por Nahavandi (2019) e Longo *et al.* (2020).

A Dimensão de Modelagem apresenta uma representação gráfica interativa da linha com elementos técnicos e humanos, operacionalizados por meio de *Sliders* de *Trade-off* (Rajesh, 2021) que tornam manipuláveis as compensações entre velocidade de produção, configuração ergonômica e tempo de ciclo. A Dimensão de Gamificação implementa um sistema de pontuação dual produtividade e bem-estar com pesos equivalentes, tornando explícita a



necessidade de equilíbrio em vez da maximização unilateral, com *Badge* de reconhecimento concedido a aprendizes que demonstram desempenho equilibrado (Otto e Hickey, 2014). A Dimensão de Dados exibe um *dashboard* analítico com gráfico de correlação entre velocidade e fadiga, mapa de calor das estações e histórico temporal de decisões, operacionalizando a Análise de Protocolo de Ericsson e Simon (1993).

O Ciclo C3 guia uma análise estruturada por questões reflexivas automatizadas que articulam prática e teoria em consonância com a Observação Reflexiva de Kolb (1984). O Ciclo C4 convida à formulação de princípios gerais extraídos da experiência, desenvolvendo pensamento sistêmico, empatia operacional e responsabilidade ética, competências centrais para a formação do engenheiro da I5.0. O detalhamento operacional completo do cenário, incluindo os demais cenários que operacionalizam os pilares de Sustentabilidade e Resiliência da I5.0, encontra-se documentado na dissertação de mestrado que deu origem a este artigo (Atanázio, 2025). A Tabela 2 sintetiza a cobertura do cenário em relação aos componentes do *framework*.

Tabela 2 – Cobertura do Cenário Emblemático em relação ao Framework LVIPI 5.0

Elemento	Coberto?	Evidência no Cenário
Princípios Norteadores (6)	5/6 (P6 parcial)	P6 - Acessibilidade não explicitado no cenário.
D1 - Modelagem (4 variáveis)	4/4	Visualização, indicadores, controles, cenário contextualizado.
D2 - Gamificação (7 variáveis)	6/7	Painel, <i>sliders</i> , missão, pontuação dual, <i>badges</i> . Ausente: narrativa elaborada (4.4).
D3 - Dados e Métricas (3 variáveis)	3/3	<i>Dashboard</i> completo: desempenho, bem-estar, histórico de decisões.
Ciclo Metodológico (4 etapas)	4/4	<i>Briefing</i> , interação livre, questões reflexivas, formulação de princípios.
Taxa de Cobertura Global	91,7% (22/24)	22 dos 24 elementos do <i>framework</i> operacionalizados.

Fonte: elaborada pelos autores (2025).

A cobertura de 91,7% evidencia que o *framework* não é uma abstração irrealizável, mas uma estrutura operacionalizável em cenários pedagógicos concretos. Hevner *et al.* (2004) argumentam que a avaliação de artefatos em estágios iniciais pode ser conduzida por métodos analíticos – cenários ilustrativos e demonstrações de aplicabilidade – antes da validação empírica extensiva. Venable, Pries-Heje e Baskerville (2016) denominam essa abordagem de avaliação *ex ante*, distinguindo-a da avaliação *ex post* realizada após a implementação. O *framework* LVIPI 5.0 é, assim, classificado como Nível 2 na taxonomia de Gregor e



Zwikael (2024) – *Nascent Design Theory*: proposição fundamentada, com aplicabilidade demonstrada, aguardando validação empírica extensiva para evoluir para níveis superiores de maturidade teórica.

O *framework* é suficientemente flexível para suportar cenários adicionais que operacionalizam os demais pilares da I5.0: Cenário 2 – *Trade-off* Sustentabilidade-Produtividade (fábrica de bebidas: consumo hídrico e energético *versus throughput*); e Cenário 3 – Resiliência-Adaptação (gestão de disrupção de fornecedor em linha de montagem eletrônica). O detalhamento completo desses cenários encontra-se documentado em Atanázio (2025).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo cumpriu seu objetivo geral ao propor o *framework* teórico-metodológico LVIPI 5.0 para a concepção e avaliação de Laboratórios Virtuais Interativos de Processos Industriais, alinhado aos pilares da I5.0 e adaptado ao perfil de aprendizagem das Gerações Z e Alpha. Os cinco objetivos específicos foram igualmente alcançados: síntese dos fundamentos teóricos (OE1), sistematização dos componentes do *framework* (OE2), estruturação do modelo conceitual (OE3), demonstração de aplicabilidade por meio de um cenário emblemático (OE4) e discussão de implicações práticas e limitações (OE5).

A contribuição central reside na integração sistêmica e original de quatro domínios tradicionalmente dissociados: MA, TIm, paradigma da I5.0 e perfil cognitivo-motivacional das novas gerações. Diferentemente de abordagens que replicam digitalmente a lógica instrucionista, o LVIPI 5.0 incorpora *trade-offs* sociotécnicos como mecanismos intrínsecos para simular decisões complexas da indústria contemporânea, concebendo uma estrutura genuinamente alinhada aos pilares da I5.0 – centralidade humana, sustentabilidade e resiliência – em vez de adaptar modelos orientados à I4.0.

A consistência do *framework* foi atestada em duas dimensões complementares de evidência *ex ante*. A primeira é de natureza bibliográfica: uma base referencial com qualidade substantiva comprovada (IAB: 42,5%; ICE: 28,1%; ICT: 84,6%; IDM: 87,5%) e rastreabilidade teórica completa, com 28 autores fundantes e 64% das variáveis com fundamentação múltipla. A segunda é de natureza aplicada: demonstração de aplicabilidade com cobertura de 91,7% (22/24 elementos) em um cenário pedagógico emblemático, indicando que o *framework* é operacionalizável em experiências educacionais concretas. Tomadas em



conjunto, essas evidências posicionam o LVIPI 5.0 como *Nascent Design Theory* – Nível 2 na taxonomia de Gregor e Zwikael (2024): proposição fundamentada, com aplicabilidade demonstrada, aguardando validação empírica extensiva para evoluir para níveis superiores de maturidade teórica.

Do ponto de vista prático, o *framework* constitui uma ferramenta estratégica para diferentes *stakeholders*. Para as Instituições de Ensino Superior, oferece um guia estruturado para superar limitações de infraestrutura física, com alinhamento às Diretrizes Curriculares Nacionais do Curso de Graduação em Engenharia (Resolução CNE/CES nº 2/2019) e aos ODS. Para docentes e *designers* instrucionais, disponibiliza um roteiro metodológico com diretrizes operacionais e um cenário emblemático como *template* replicável. Para discentes das Gerações Z e Alpha, propõe experiências alinhadas às suas expectativas de interatividade e autonomia. Para o setor produtivo, contribui para a formação de egressos com visão sistêmica, capacidade de tomada de decisão multicritério e consciência ética.

As principais limitações decorrem da natureza teórico-propositiva do estudo, inerente e justificável pelo escopo de uma dissertação de mestrado focada na construção e na fundamentação rigorosa do artefato conceitual. A limitação primária é a ausência de validação empírica com discentes em contexto real (L1): nesta etapa, não é possível mensurar a eficácia pedagógica quantitativa, o impacto no engajamento em longo prazo nem a usabilidade técnica em implementações concretas. A avaliação heurística por um painel de especialistas – segunda estratégia de avaliação *ex ante*, cujo protocolo está integralmente documentado em Atanázio (2025) – não foi executada no âmbito deste artigo e constitui a continuidade imediata da pesquisa, com resultados a serem reportados em publicação subsequente. As demais limitações compreendem a dependência de infraestrutura tecnológica e de formação docente específica (L2), a necessidade de adaptação contextual para outros cenários culturais e disciplinares (L3) e o corte temporal da base referencial em dezembro de 2024 (L4).

A agenda de pesquisas futuras organiza-se em cinco linhas prioritárias: (i) execução da avaliação heurística com especialistas e publicação de seus resultados (curto prazo imediato); (ii) validação empírica ampliada com discentes em contexto real (curto prazo); (iii) integração com IA Generativa e *Digital Twins* e desenvolvimento de ferramentas de apoio à adoção (médio prazo); (iv) estudo longitudinal do impacto profissional (longo prazo); e (v) adaptações contextuais para outros cursos de Engenharia e para outros níveis de ensino (contínuo).



Conclui-se que o *framework* LVIPI 5.0 estabelece fundamentos teóricos e metodológicos sólidos para o desenvolvimento de uma nova geração de ambientes educacionais imersivos na Engenharia de Produção. Ao posicionar-se na interseção entre inovação pedagógica, avanço tecnológico e responsabilidade socioambiental, esta pesquisa contribui para a formação de engenheiros preparados para liderar as transformações necessárias para uma indústria mais sustentável, resiliente e centrada no bem-estar humano.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção (PEP) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) pelo suporte acadêmico e institucional. Agradecem, em especial, à UFRN pelo suporte físico e estrutural oferecido durante a execução desta pesquisa. Agradecem também à Prof^a. Dr^a. Mariana Rodrigues de Almeida pela orientação precisa, pelas discussões intelectuais fundamentais e pelo constante estímulo à qualidade acadêmica ao longo de todo o desenvolvimento deste trabalho. Do mesmo modo, agradecem ao Prof. Dr. Hélio Roberto Hekis pela contribuição ao desenvolvimento desta pesquisa e pelos incentivos que auxiliaram na superação dos desafios inerentes a esse percurso. Expressam também seu apreço pelas demais instituições de ensino e pesquisa cujos acervos digitais foram essenciais para a revisão da literatura e para a fundamentação teórica que sustentam este estudo.

REFERÊNCIAS

- ATANÁZIO, J. N. O. A influência das *soft skills* nos métodos ativos de ensino superior. In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 30., 2023, Bauru. **Anais [...]**. Bauru: UNESP, 2023. p. 1–15.
- ATANÁZIO, J. N. O. **Proposição de um framework teórico-metodológico para laboratórios virtuais de aprendizagem imersiva na Engenharia de Produção**. 2025. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2025.
- BANKS, J. *et al.* **Discrete-event system simulation**. 5. ed. New Jersey: Pearson, 2010.
- BARDIN, L. **Análise de conteúdo**. São Paulo: Edições 70, 2011.
- BARROWS, H. S. Problem-based learning in medicine and beyond: a brief overview. **New Directions for Teaching and Learning**, v. 68, p. 3–12, 1996.



- BRASIL. Conselho Nacional de Educação. Câmara de Educação Superior. **Resolução CNE/CES nº 2, de 24 de abril de 2019**. Institui as Diretrizes Curriculares Nacionais do Curso de Graduação em Engenharia. *Diário Oficial da União*: Brasília, DF, 26 abr. 2019.
- CARD, S. K.; MACKINLAY, J. D.; SHNEIDERMAN, B. **Readings in information visualization: using vision to think**. San Francisco: Morgan Kaufmann, 1999.
- DALGARNO, B.; LEE, M. J. W. What are the learning affordances of 3-D virtual environments? **British Journal of Educational Technology**, v. 41, n. 1, p. 10–32, 2010.
- DETERDING, S. *et al.* From game design elements to gamefulness: defining gamification. In: INTERNATIONAL ACADEMIC MINDTREK CONFERENCE, 15., 2011. **Proceedings [...]**. New York: ACM, 2011.
- DEWEY, J. **Democracy and education: an introduction to the philosophy of education**. New York: Macmillan, 1916.
- DEWEY, J. **Experience and education**. New York: Macmillan, 1938.
- ERICSSON, K. A.; SIMON, H. A. **Protocol analysis: verbal reports as data**. Cambridge: MIT Press, 1993.
- EROL, S. *et al.* Tangible Industry 4.0: a scenario-based approach to learning for the future of production. **Procedia CIRP**, v. 54, p. 13–18, 2016.
- EUROPEAN COMMISSION. **Industry 5.0: towards a sustainable, human-centric and resilient European industry**. Brussels: European Commission, 2021.
- FREEMAN, S. *et al.* Active learning increases student performance in science, engineering, and mathematics. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 111, n. 23, p. 8410–8415, 2014.
- GARRETT, J. J. **The elements of user experience**. 2. ed. Berkeley: New Riders, 2010.
- GUSENBAUER, M.; HADDAWAY, N. R. Which academic search systems are suitable for systematic reviews or meta-analyses? **Research Synthesis Methods**, v. 11, n. 2, p. 181–217, 2020.
- HEVNER, A. R. *et al.* Design science in information systems research. **MIS Quarterly**, v. 28, n. 1, p. 75–105, 2004.
- HUNICKE, R.; LEBLANC, M.; ZUBEK, R. MDA: a formal approach to game design and game research. In: AAAI WORKSHOP ON CHALLENGES IN GAME AI, 2004, San Jose. **Proceedings [...]**. San Jose, 2004.
- JABAREEN, Y. Building a conceptual framework: philosophy, definitions, and procedure. **International Journal of Qualitative Methods**, v. 8, n. 4, p. 49–62, 2009.
- JENSEN, L.; KONRADSEN, F. A review of the use of virtual reality head-mounted displays in education and training. **Education and Information Technologies**, v. 23, n. 4, p. 1515–1529, 2018.
- KANS, M.; CAMPOS, J.; HAKANSSON, L. A remote laboratory for Maintenance 4.0 training and education. **IFAC-PapersOnLine**, v. 53, n. 2, p. 101–106, 2020.
- KAPP, K. M. **The gamification of learning and instruction: game-based methods and strategies for training and education**. San Francisco: Pfeiffer, 2012.
- KNAFLIC, C. N. **Storytelling with data: a data visualization guide for business professionals**. Hoboken: Wiley, 2015.
- KOLB, D. A. **Experiential learning: experience as the source of learning and development**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1984.



- LONGO, F. *et al.* Value-oriented and ethical technology engineering in Industry 5.0: a human-centric perspective for the design of the factory of the future. **Applied Sciences**, v. 10, n. 12, 4182, 2020.
- MACINNIS, D. J. A framework for conceptual contributions in marketing. **Journal of Marketing**, v. 75, n. 4, p. 136–154, 2011.
- MAYER, R. E. **Multimedia learning**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.
- MILGRAM, P.; KISHINO, F. A taxonomy of mixed reality visual displays. **IEICE Transactions on Information and Systems**, v. E77-D, n. 12, p. 1321–1329, 1994.
- NAHAVANDI, S. Industry 5.0: a human-centric solution. **Sustainability**, v. 11, n. 16, 4371, 2019.
- NIELSEN, J. **Usability engineering**. San Francisco: Morgan Kaufmann, 1994.
- NORMAN, D. **The design of everyday things**. rev. ed. New York: Basic Books, 2013.
- OTTO, N.; HICKEY, D. Design principles for digital badge systems. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WEB-BASED LEARNING, 2014. **Lecture Notes in Computer Science**. 2014.
- PAGE, M. J. *et al.* The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. **BMJ**, v. 372, n71, 2021.
- PARÉ, G. *et al.* Synthesizing information systems knowledge: a typology of literature reviews. **Information & Management**, v. 52, n. 2, p. 183–199, 2015.
- PATTON, M. Q. **Qualitative research & evaluation methods: integrating theory and practice**. 4. ed. Thousand Oaks: SAGE Publications, 2015.
- PEFFERS, K. *et al.* A design science research methodology for information systems research. **Journal of Management Information Systems**, v. 24, n. 3, p. 45–77, 2007.
- POTKONJAK, V. *et al.* Virtual laboratories for education in science, technology, and engineering: a review. **Computers & Education**, v. 95, p. 309–327, 2016.
- PRENSKY, M. Digital natives, digital immigrants. **On the Horizon**, v. 9, n. 5, p. 1–6, 2001.
- PRINCE, M. Does active learning work? A review of the research. **Journal of Engineering Education**, v. 93, n. 3, p. 223–231, 2004.
- RADIANTI, J. *et al.* A systematic review of immersive virtual reality applications for higher education: design elements, lessons learned, and research agenda. **Computers & Education**, v. 147, 103778, 2020.
- RYAN, R. M.; DECI, E. L. Self-determination theory and the facilitation of intrinsic motivation, social development, and well-being. **American Psychologist**, v. 55, n. 1, p. 68–78, 2000.
- RYAN, R. M.; RIGBY, C. S.; PRZYBYLSKI, A. The motivational pull of video games: a self-determination theory approach. **Motivation and Emotion**, v. 30, n. 4, p. 344–360, 2006.
- SHELL, J. **The art of game design: a book of lenses**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2019.
- SCHLOCHAUER, C. **Lifelong learners: o poder do aprendizado contínuo: aprenda a aprender e mantenha-se relevante em um mundo repleto de mudanças**. 1. ed. São Paulo: Gente, 2021. 256 p.
- SCHÖN, D. **The reflective practitioner: how professionals think in action**. New York: Basic Books, 1983.
- SEEMILLER, C.; GRACE, M. **Generation Z goes to college**. San Francisco: Jossey-Bass, 2016.



- SHNEIDERMAN, B. **Designing the user interface: strategies for effective human-computer interaction**. 3. ed. Reading: Addison-Wesley, 1998.
- SQUIRES, D.; PREECE, J. Predicting quality in educational software. **Interacting with Computers**, v. 11, n. 5, p. 467–483, 1999.
- TAPSCOTT, D. **Grown up digital: how the net generation is changing your world**. New York: McGraw-Hill, 2009.
- ÚRDÜR BROO, D. *et al.* Developing a conceptual framework for Industry 5.0. **Procedia Computer Science**, v. 200, p. 1751–1760, 2022.
- VENABLE, J.; PRIES-HEJE, J.; BASKERVILLE, R. FEDS: a framework for evaluation in design science research. **European Journal of Information Systems**, v. 25, n. 1, p. 77–89, 2016.
- VOM BROCKE, J. *et al.* Reconstructing the giant: on the importance of rigour in documenting the literature search process. In: EUROPEAN CONFERENCE ON INFORMATION SYSTEMS (ECIS), 2009. **Proceedings [...]**. 2009.
- WEBSTER, J.; WATSON, R. T. Analyzing the past to prepare for the future: writing a literature review. **MIS Quarterly**, v. 26, n. 2, p. xiii–xxiii, 2002.
- XU, X. *et al.* Industry 4.0 and Industry 5.0: inception, conception and perception. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 61, p. 530–535, 2021.
- ZICHERMANN, G.; CUNNINGHAM, C. **Gamification by design: implementing game mechanics in web and mobile apps**. Sebastopol: O'Reilly, 2011.