



**Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia
de Produção (SAEPRO) da EEL-USP**

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

**Metodologias Ativas e Imersivas para a Educação em Engenharia de
Produção: Um Framework para Laboratórios Virtuais na Era da
Indústria 5.0**

**Active and Immersive Methodologies for Production Engineering
Education: A Framework for Virtual Laboratories in the Industry 5.0
Era**

**Metodologías Activas e Inmersivas para la Educación en Ingeniería de
Producción: Un Framework para Laboratorios Virtuales en la Era de
la Industria 5.0**

José Neilson de Oliveira Atanázio

Universidade Federal do Rio Grande do Norte (jose.neilson.046@ufrn.edu.br)

Hélio Roberto Hekis

Universidade Federal do Rio Grande do Norte (helio.hekis@ufrn.br)

Mariana Rodrigues de Almeida

Universidade Federal do Rio Grande do Norte (almeidamariana@yahoo.com)

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 e avalia o *framework* teórico-metodológico LVIPI 5.0 (Laboratórios Virtuais Interativos de Processos Industriais para a Indústria 5.0) para a concepção e avaliação de laboratórios virtuais interativos de processos industriais. De natureza teórico-conceitual, a



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

metodologia envolveu síntese de literatura, estruturação conceitual e proposição de uma avaliação heurística com especialistas. Os resultados demonstram a consistência do *framework*, que integra quatro pilares: Metodologias Ativas (abordagem t-LLP - *Technology-Enhanced Lifelong Learning Process*), Tecnologias Imersivas, princípios da Indústria 5.0/Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e perfil das gerações Z/Alpha. A análise bibliométrica de 150 referências atestou fundamentação abrangente e atualizada. A operacionalização em três cenários pedagógicos (eficiência-ergonomia, sustentabilidade-productividade, resiliência-adaptação) confirmou sua aplicabilidade e diferencial sociotécnico, posicionando *trade-offs* entre eficiência, sustentabilidade e bem-estar humano como elementos centrais de aprendizagem. Conclui-se que o *framework* estabelece diretrizes viáveis para o desenvolvimento de laboratórios virtuais de nova geração, contribuindo para uma educação em engenharia mais alinhada com demandas contemporâneas. Sua principal limitação é a natureza teórica, demandando validação empírica futura.

Palavras-chave: Gerações Z e Alpha, Indústria 5.0, Laboratórios Virtuais, Metodologias Ativas, Metodologias Imersivas.

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 and evaluates the LVIPI 5.0 (Interactive Virtual Laboratories for Industrial Processes for Industry 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 literature synthesis, conceptual structuring, and the proposition of a heuristic evaluation with specialists. The results demonstrate the framework's consistency, integrating four pillars: Active Methodologies (t-LLP - Technology-Enhanced Lifelong Learning Process approach), Immersive Technologies, Industry 5.0/Sustainable



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

Development Goals (SDGs) principles, and the profile of Generations Z/Alpha. The bibliometric analysis of 150 references attested to a comprehensive and up-to-date foundation. Its operationalization in three pedagogical scenarios (efficiency-ergonomics, sustainability-productivity, resilience-adaptation) confirmed its applicability and socio-technical differential, positioning trade-offs between efficiency, sustainability, and human well-being as central learning elements. It is concluded that the framework establishes viable guidelines for the development of next-generation virtual laboratories, contributing to an engineering education more aligned with contemporary demands. Its main limitation is its theoretical nature, requiring future empirical validation.

Keywords: Generations Z and Alpha, Industry 5.0, Virtual Laboratories, Active Methodologies, Immersive Methodologies.

Resumen

La enseñanza de la Ingeniería de Producción demanda enfoques innovadores que alineen la transformación digital con la formación para la Industria 5.0, considerando el perfil de las generaciones Z y Alpha y las limitaciones de los laboratorios físicos. Este artículo propone y evalúa el *framework* teórico-metodológico LVIPI 5.0 (Laboratorios Virtuales Interactivos de Procesos Industriales para la Industria 5.0) para la concepción y evaluación de laboratorios virtuales interactivos de procesos industriales. De naturaleza teórico-conceptual, la metodología involucró la síntesis de literatura, estructuración conceptual y la proposición de una evaluación heurística con especialistas. Los resultados demuestran la consistencia del *framework*, que integra cuatro pilares: Metodologías Activas (enfoque t-LLP - Technology-Enhanced Lifelong Learning Process), Tecnologías Inmersivas, principios de la Industria 5.0/Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y perfil de las generaciones Z/Alpha. El análisis bibliométrico de 150 referencias atestó una fundamentación comprehensiva y actualizada. La operacionalización en tres escenarios pedagógicos (eficiencia-ergonomía, sostenibilidad-productividad, resiliencia-adaptación) confirmó su aplicabilidad y diferencial sociotécnico, posicionando las



compensaciones (*trade-offs*) entre eficiencia, sostenibilidad y bienestar humano como elementos centrales de aprendizaje. Se concluye que el *framework* establece directrices viables para el desarrollo de laboratorios virtuales de nueva generación, contribuyendo a una educación en ingeniería más alineada con las demandas contemporáneas. Su principal limitación es la naturaleza teórica, que demanda una validación empírica futura.

Palabras clave: Generaciones Z y Alpha, Industria 5.0, Laboratorios Virtuales, Metodologías Activas, Metodologías Inmersivas.

1. INTRODUÇÃO

O ensino de Engenharia de Produção (EdP) enfrenta o duplo desafio: acompanhar a aceleração da transformação digital e, simultaneamente, formar profissionais aptos a liderar a transição para um paradigma industrial sustentável e centrado no ser humano. A emergente Quinta Revolução Industrial (Indústria 5.0) amplia o escopo tecnocêntrico da Indústria 4.0 (I4.0), colocando a tecnologia a serviço da resiliência, da sustentabilidade e do bem-estar humano (SCHWAB, 2016; XU *et al.*, 2021; ÚRDÜR BROO *et al.*, 2022). Para superar este desafio, a adoção de Metodologias Ativas (MA) e Metodologias Imersivas (MI) torna-se fundamental, capaz de alinhar a formação acadêmica às demandas da Indústria 5.0 (I5.0), considerando o perfil das gerações Z e Alpha e as limitações de laboratórios físicos.

Paralelamente, o perfil discente evoluiu acentuadamente. As gerações Z e Alpha, como nativos digitais, consomem informação de forma não linear, valorizam a interatividade, a colaboração e o *feedback* imediato, demonstrando engajamento reduzido com modelos pedagógicos tradicionais baseados em aulas expositivas (SEEMILLER; GRACE, 2016). Suas características demandam experiências educacionais imersivas, personalizadas e gamificadas, alinhadas às premissas das MA e da abordagem *Learning by Doing* - LbD (DEWEY, 1916).

A formação prática em EdP, no entanto, 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). Neste contexto, a formação prática esbarra em obstáculos significativos, como os custos elevados de laboratórios físicos e sua rápida obsolescência. As Tecnologias Imersivas (TI), notadamente os Laboratórios Virtuais (LV), surgem como uma alternativa viável para superar essas barreiras (RADIANTI *et al.*, 2020; JENSEN; KONRADSEN, 2018). No entanto, a literatura necessita de estudos que integrem de forma sistêmica três eixos fundamentais: as demandas da I5.0, o perfil de aprendizagem das novas gerações e o potencial das TI mediadas por MA. Diante dessa lacuna, este artigo propõe e avalia um *framework* (FWK) teórico-metodológico para o desenvolvimento de Laboratórios Virtuais Interativos de Processos Industriais (LVIPI) alinhados à Indústria 5.0.

Diante desse cenário, emerge o problema de pesquisa: Como estruturar um *framework* teórico-metodológico, baseado em Metodologias Ativas e Imersivas, para o desenvolvimento de LVIPI alinhados à Indústria 5.0? Este trabalho tem como objetivo geral propor um *framework* teórico-metodológico baseado em Metodologias Ativas e Imersivas para a concepção e avaliação de LVIPI, alinhado aos pilares da Indústria 5.0 e adaptado ao perfil de aprendizagem das gerações Z e Alpha. Os objetivos específicos são: (1) Sintetizar os fundamentos da Indústria 5.0, Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, Metodologias Ativas e características das gerações Z e Alpha; (2) Identificar componentes centrais para construção de LVIPI; (3) Estruturar o *framework* como modelo conceitual; (4) Avaliar sua consistência via avaliação heurística com especialistas; (5) Discutir implicações práticas e limitações.

A análise crítica da literatura revela uma lacuna multidimensional que justifica esta pesquisa. Existe abundância de simuladores para habilidades operacionais da I4.0 (JENSEN; KONRADSEN, 2018; KANS *et al.*, 2020), porém há escassez de pesquisas 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, pois soluções existentes frequentemente replicam a lógica



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

instrucionista do laboratório físico, sem incorporar sistematicamente MA como *Problem-Based Learning* (PBL) e elementos de gamificação para engajar as gerações Z e Alpha (PRINCE, 2004). Finalmente, poucos trabalhos conectam explicitamente o desenvolvimento de LV aos marcos legais brasileiros e aos ODS.

Para evitar ambiguidades e delimitar o escopo deste estudo, é crucial estabelecer a distinção conceitual entre TI e MI, que operam como eixos complementares no FWK proposto. As TI referem-se aos artefatos tecnológicos - como simuladores, ambientes de Realidade Virtual e Aumentada - que criam um senso de presença e envolvimento sensorial em um ambiente digital. Tratam-se, dos meios ou ferramentas de implementação. Já as MI constituem uma abordagem pedagógica que se apropria dessas tecnologias para criar experiências de aprendizagem profundamente contextualizadas e centradas na resolução ativa de problemas. Nesse sentido, representam a operacionalização dos princípios das MA (como PBL e LbD) mediadas pelas TI, onde o discente é colocado no centro de cenários complexos e autênticos da I5.0. Dessa forma, o FWK LVUPI 5.0 posiciona-se na interseção desses dois domínios, utilizando as TI para viabilizar as MI, as quais, por sua vez, são o veículo para o desenvolvimento das competências requeridas no novo paradigma industrial.

A pesquisa reside, em desenvolver um FWK que sintetize, de forma pioneira, os princípios da I5.0, as premissas das MA, as características das novas gerações e os critérios dos ODS. Como demonstra a análise anterior, esta síntese preenche uma lacuna significativa na literatura especializada. O valor distintivo está não em criar "mais um" LV, mas em fornecer uma fundamentação teórico-metodológica consistente que traduza princípios macro da I5.0 em elementos concretos de *design* pedagógico e tecnológico.

Esta pesquisa contribui acadêmica, social e praticamente ao integrar domínios tradicionalmente dissociados: Educação em Engenharia, Estudos da I5.0 e Tecnologia Educacional. Socialmente, alinha-se à Agenda 2030, especialmente aos ODS 4 (Educação de Qualidade) e ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura), ao desenvolver soluções educacionais virtuais e escaláveis que democratizam o acesso a experiências práticas de alta qualidade. Praticamente, oferece às Instituições de Ensino Superior (IES) um guia



estruturado para desenvolvimento de LV, e ao setor industrial, egressos preparados para os desafios da I5.0 com visão sistêmica.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A evolução das Metodologias Ativas de Ensino fundamenta-se na contestação ao modelo tradicional de educação. John Dewey (1916) estabeleceu o princípio do LbD, defendendo que a Aprendizagem Significativa ocorre pela experiência direta e reflexão sobre a ação. David Kolb (1984) formalizou o Ciclo de Aprendizagem Vivencial, articulando experiência concreta, observação reflexiva, conceptualização abstrata e experimentação ativa. O século XX operacionalizou esses conceitos mediante abordagens como PBL (BARROWS, 1996) e *Project-Based Learning* (PIBL), focando na investigação e solução de problemas reais.

No contexto das Revoluções Industriais 4.0 e 5.0, surge a abordagem *Technology-Enhanced Lifelong Learning Process* (t-LLP) (ATANÁZIO, 2023), integrando três componentes sinérgicos: t-LbD (*Technology-Enhanced Learning by Doing*) - atualiza Dewey e Kolb mediando experiência prática com tecnologias digitais; t-LLL (*Technology-Enhanced Lifelong Learning*) - enfatiza aprendizagem contínua e adaptabilidade (SCHLOCHAUER, 2021); t-PBL (*Technology-Enhanced Problem-Based Learning*) - potencializa a abordagem de Barrows com ferramentas digitais para investigar problemas da indústria moderna. Esta abordagem fornece a estrutura metodológica para integrar ação, resolução de problemas e aprendizagem contínua em ambientes tecnologicamente mediados.

As TI representam a culminação da integração de recursos digitais na educação, ecoando o pragmatismo de Dewey (1938) sobre aprendizado pela experiência direta. O marco conceitual foi estabelecido por Milgram e Kishino (1994) com o *Virtualidade Continuum*, categorizando ambientes do real ao virtual. A efetividade pedagógica das TI ancora-se na Teoria da Aprendizagem Experiencial de Kolb (1984), facilitando a compreensão de



conceitos complexos ao transformar abstrações em experiências concretas (DALGARNO; LEE, 2010).

Os LV emergiram como resposta às limitações de infraestrutura física, evoluindo de réplicas digitais para ambientes sofisticados que expandem possibilidades didáticas (NICKERSON, 2006; POTKONJAK *et al.*, 2016). Sua capacidade de criar ambientes de risco controlado os torna veículos ideais para operacionalizar MA como PBL e LbD (RADIANTI *et al.*, 2020), especialmente para engajar o perfil de aprendizagem das gerações Z e Alpha, que valorizam estímulos multimodais (RYAN; RIGBY; PRZYBYLSKI, 2006).

A I5.0 representa evolução do paradigma tecnocêntrico da I4.0, colocando a tecnologia a serviço da resiliência, sustentabilidade e bem-estar humano (XU *et al.*, 2021; EUROPEAN COMMISSION, 2021), demandando engenheiros com visão sistêmica capazes de ponderar eficiência, impacto ambiental e fatores humanos. Este alinhamento encontra suporte nos ODS da Organização das Nações Unidas: ODS 4 (Educação de Qualidade) promove educação inclusiva e competências para trabalho decente; ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura) busca industrialização inclusiva e sustentável.

A formação para este contexto exige abordagem educacional além da transmissão de conhecimento. As MA, operacionalizando princípios de Dewey (1938) e Freire (1970), criam ecossistemas onde o discente internaliza valores de sustentabilidade e ética ao simular desafios reais. O FWK proposto posiciona-se na interseção entre I5.0 e ODS, fornecendo diretrizes para experiências de aprendizagem que preparem engenheiros para liderar a transição para sistemas produtivos sustentáveis e centrados no humano.

As gerações Z (1995-2010) e Alpha (pós-2010), caracterizadas como "nativos digitais" (PRENSKY, 2001), consomem informação de forma não linear, valorizam interatividade, colaboração e *feedback* imediato (TAPSCOTT, 2009; DEDE, 2005). Sua preferência por recursos multimodais é respaldada pela Teoria Cognitiva da Aprendizagem Multimídia (MAYER, 2009), demonstrando que integração coerente de informações visuais e verbais facilita aprendizagem profunda. Evidências mostram que MA reduzem reprovação e

elevam desempenho nesse público (FREEMAN *et al.*, 2014), com estratégias como gamificação (KAPP, 2012) atendendo expectativas por *feedback* imediato e desafios progressivos.

A Teoria da Autodeterminação (RYAN; DECI, 2000) é central para fundamentar o engajamento dessas gerações, propondo que motivação intrínseca deriva da satisfação de três necessidades psicológicas: autonomia (controle e volição), competência (maestria e eficácia) e relacionamento (conexão social). Enquanto o modelo tradicional frustra essas necessidades, MA e ambientes imersivos possuem potencial único para satisfazê-las pela natureza interativa, desafiadora e colaborativa, revelando a necessidade de FWK educacionais que ofereçam interatividade, agência, personalização e elementos de engajamento.

A avaliação de ambientes educacionais imersivos exige uma abordagem que transcenda os critérios tradicionais de usabilidade. Propõe-se, portanto, uma Avaliação Heurística Adaptada, expandindo os princípios de Nielsen (1994) para incluir três dimensões inter-relacionadas:

1. Heurísticas de Usabilidade Técnica: Avaliação da interface, navegação e prevenção de erros;
2. Heurísticas de Qualidade Pedagógica: Clareza dos objetivos de aprendizagem e potencial para promover reflexão crítica;
3. Heurísticas de Alinhamento à I5.0 e Sustentabilidade: Capacidade de simular *trade-offs* entre eficiência, impacto ambiental e bem-estar humano.

3. MÉTODO

Esta pesquisa adota abordagem teórico-conceitual e descritiva, visando propor um FWK teórico-metodológico para desenvolvimento de LVIPI alinhados à I5.0. A natureza do estudo consiste em síntese conceitual e construção de modelos teóricos, seguindo um ciclo de síntese, estruturação e avaliação crítica, inspirado em metodologias para desenvolvimento de FWKs (JABAREEN, 2009; MACINNIS, 2011).

O FWK foi desenvolvido mediante processo sistemático em três etapas sequenciais:

Etapa 1 - Síntese dos Pilares Fundamentais: Baseada em revisão aprofundada da literatura, foram identificados e sintetizados quatro pilares conceituais: (1) MA (abordagem t-LLP) para base pedagógica; (2) TI (LV) para meio de implementação; (3) I5.0 e Sustentabilidade (ODS) para contexto e valores de referência; (4) Perfil das Gerações Z e Alpha para desenho da experiência do usuário.

Etapa 2 - Estruturação e Integração Conceitual: Os pilares foram inter-relacionados mediante: (a) identificação de componentes centrais de cada pilar (ex.: do pilar "MA", extraiu-se "ciclo de Aprendizagem Experiencial"); (b) definição de relações entre componentes de diferentes pilares; (c) elaboração do modelo conceitual com representação visual e textual do FWK, explicitando componentes, relações e fluxo de aplicação.

Etapa 3 - Definição de Métricas de Avaliação: Foram estabelecidas diretrizes para avaliação futura de artefatos desenvolvidos sob o FWK, derivadas de uma Avaliação Heurística Adaptada. Esta abordagem, mencionada na seção anterior, fundamentada em Nielsen (1994) mas expandida para o contexto educacional e princípios da I5.0, integra três dimensões inter-relacionadas: (1) Heurísticas de Usabilidade Técnica; (2) Heurísticas de Qualidade Pedagógica; e (3) Heurísticas de Alinhamento à I5.0 e Sustentabilidade.

Para garantir rigor metodológico na seleção e classificação do referencial teórico, adotou-se protocolo sistemático baseado no *Design Science Research* (DSR) de Hevner *et al.* (2004) e Peffers *et al.* (2007), com duas etapas:

Classificação por Critérios de Inclusão (CI): As referências foram classificadas segundo três CI alinhados às fases do DSR: CIO1 - *Design* e Desenvolvimento do Artefato (fundamentos de MA, *design* instrucional, gamificação, arquiteturas imersivas); CIO2 - Avaliação e Validação (estudos aplicados, testes de usabilidade, eficácia pedagógica); CIO3 - Revisão e Contextualização (revisões sistemáticas, meta-análises, estado da arte);

Para os Índices de Qualidade Bibliográfica (IQB) foram desenvolvidos quatro índices: IAB (Índice de Atualidade Bibliográfica) = proporção de referências ≥ 2020 ; ICE (Índice

de Cobertura Emergente) = cobertura de IA, Metaverso e I5.0; ICT (Índice de Convergência Tecnológica) = aplicabilidade educacional das referências técnicas; IDM (Índice de Diversidade Metodológica) = variedade de abordagens metodológicas.

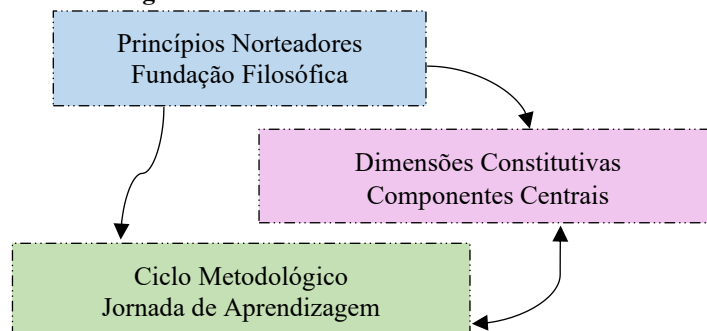
Para a futura validação da consistência do FWK, está planejada uma avaliação heurística com a participação de especialistas. O método proposto consiste em uma avaliação adaptada, com foco na análise do modelo conceitual e da documentação do FWK. Pretende-se compor um painel de cinco a sete especialistas, selecionados por amostragem intencional (PATTON, 2015), com expertise em pelo menos um dos pilares do FWK: Educação em Engenharia e MA; Tecnologias Educacionais e Ambientes Imersivos; Indústria 4.0/5.0; e Sustentabilidade.

Como instrumento, está previsto que os especialistas recebem a documentação completa do FWK e um roteiro estruturado para análise, baseado nos seguintes critérios: consistência e coerência interna; clareza e compreensibilidade; abrangência e relevância; aplicabilidade e utilidade percebida; e aderência aos fundamentos teóricos. Os dados qualitativos, a serem coletados por meio de formulários, serão submetidos à Análise de Conteúdo Temática (BARDIN, 2011).

4. RESULTADOS

Conforme ilustrado na Figura 1, a arquitetura do FWK organiza-se a partir dos Princípios Norteadores, que constituem sua fundação filosófica. Estes princípios subdividem-se em diretrizes pedagógicas - que materializam premissas do LbD (DEWEY, 1916) e da Aprendizagem Experiencial (KOLB, 1984) - e em princípios de *design* de experiência, alinhados às necessidades de autonomia e *feedback* imediato das gerações Z e Alpha (RYAN; DECI, 2000).

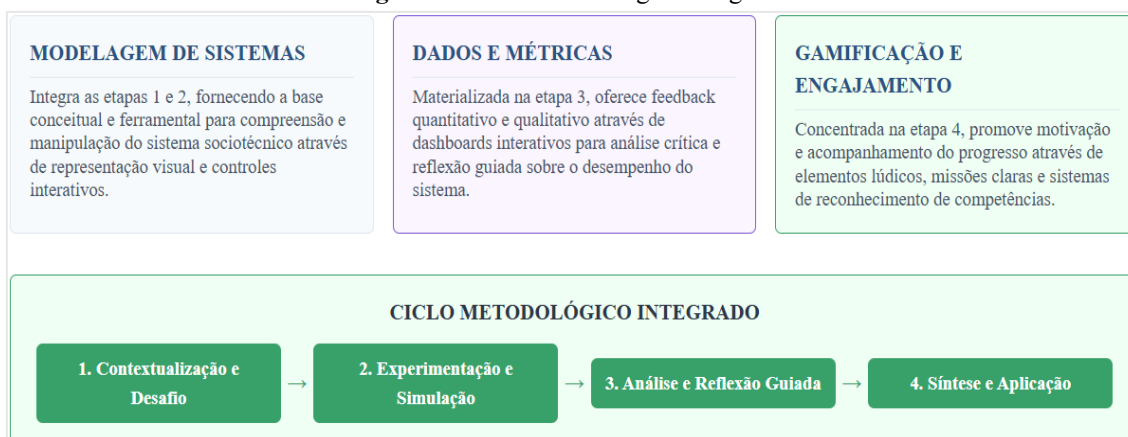
Figura 1 - Estrutura do framework LVIPI 5.0



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Estes princípios fundamentam e orientam as Dimensões Constitutivas, que são os componentes centrais para a implementação prática do FWK em LV. Esta dimensão opera através da modelagem de sistemas sociotécnicos (integrando variáveis técnicas, humanas e de sustentabilidade), como ilustrado nas Figuras 2 e 3, de mecanismos de gamificação baseados na estrutura MDA (*Mechanics, Dynamics, Aesthetics*) e da coleta e visualização de dados para análise. O fluxo de aprendizagem é governado pelo Ciclo Metodológico, uma jornada experiencial iterativa que guia o discente através da contextualização em um cenário problemático autêntico da I5.0, da experimentação e simulação no ambiente virtual (materializando o LbD) e da análise e reflexão guiada sobre os resultados, articulando a prática com a teoria.

Figura 2 - Ciclo metodológico integrado



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 3 - Representação visual do framework conceitual



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Para transcender a abstração conceitual e orientar a implementação prática do FWK LVIPI 5.0, são propostas as seguintes diretrizes operacionais. Estas diretrizes visam auxiliar docentes e *designers* instrucionais na tradução dos pilares teóricos em elementos concretos de *design* pedagógico e tecnológico.

A. Definição do Cenário com *Trade-off* Sociotécnico:

- **Identificação do Dilema:** Selecionar um problema autêntico da I5.0 que envolva um conflito claro entre, pelo menos, duas dimensões (ex.: eficiência produtiva vs. bem-estar humano; produtividade vs. impacto ambiental);

- Parametrização das Variáveis: Transformar esse dilema em variáveis quantificáveis e manipuláveis no ambiente virtual. Por exemplo, a "velocidade da esteira" (eficiência) e o "índice de fadiga" (bem-estar) devem ser modelados para variar de forma antagônica.

B. Configuração da Camada de Gamificação (Baseada na Estrutura MDA):

- *Mechanics* (Mecânicas): Definir os elementos básicos de interação.

Dentre os exemplos, destacam-se:

- *Sliders de Trade-off*: Para manipulação direta das variáveis em conflito;
- Sistema de Pontuação: Atribuir pontos com base no equilíbrio alcançado entre as dimensões, e não apenas na maximização de uma delas;
- *Badges* (Medalhas): Criar distintivos para reconhecer competências específicas, como "Otimizador Socioambiental" ou "Estrategista da Resiliência".
- *Dynamics* (Dinâmicas): Projetar como o usuário interage com as mecânicas ao longo do tempo. Deve-se promover uma dinâmica de exploração e tomada de decisão ponderada, onde o *feedback* imediato sobre as consequências de cada ajuste leve a uma reflexão crítica;
- *Aesthetics* (Estéticas): Buscar evocar sensações de desafio e descoberta, alinhadas à resolução de problemas complexos, satisfazendo assim as necessidades psicológicas de autonomia e competência (RYAN; DECI, 2000).

C. Implementação do *Dashboard* de Métricas:

- O *dashboard* deve apresentar de forma clara e simultânea os indicadores de todas as dimensões do *trade-off* (técnica, humana, ambiental);
- Deve incluir um histórico de decisões que permita ao aprendiz visualizar a trajetória de suas escolhas e seus impactos multifacetados, facilitando a análise reflexiva.

5. DISCUSSÕES

A fim de assegurar o rigor teórico e a abrangência da fundamentação, foi conduzida uma análise bibliométrica do *corpus* composto por 150 referências, que integram o arcabouço teórico desta pesquisa, originalmente desenvolvida no contexto de uma dissertação de mestrado em andamento (ATANÁZIO, 2025). Deste modo, a avaliação do FWK LVIPI 5.0 teve início com a análise sistemática dessa base bibliográfica, cujas referências foram classificadas segundo os critérios do DSR. A Tabela 1 apresenta a distribuição das obras conforme os critérios do DSR e Índices de Qualidade, evidenciando uma fundamentação estrategicamente balanceada entre a construção do artefato, sua validação e a contextualização do domínio.

Tabela 1 - Distribuição das referências por critérios DSR

Critério	Quantidade	Percentual	Foco
CI01 - Design e Desenvolvimento	71	47,3%	Foco prioritário na construção do artefato
CI02 - Avaliação e Validação	31	20,7%	Suporte sólido para mecanismos de validação
CI03 - Revisão e Contextualização	78	52,0%	Compreensão ampla do domínio problemático
Referências com múltiplos critérios	56	37,3%	Alta interdisciplinaridade e na base teórica

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Os percentuais não somam 100% devido à possibilidade de múltiplos critérios por estudo. A Tabela 2 mostra a distribuição das bibliografias com base em critérios de qualidade, facilitando a comparação entre as fontes.

Tabela 2 - Índices de qualidade da base bibliográfica

Critério	Quantidade	Percentual	Foco
IAB	60 ref. ≥ 2020	40,0%	Base temporalmente relevante
ICE	40 ref.	26,7%	Boa cobertura de temas de fronteira (IA, I5.0, Metaverso)
ICT	62 de 74 (CI01)	83,8%	Alta aplicabilidade educacional das referências técnicas
IDM	7 categorias únicas	87,5%	Base metodologicamente diversificada

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A fundamentação conceitual do FWK LVIPI 5.0 é inicialmente evidenciada por sua construção sobre uma base bibliográfica criteriosa, examinada à luz dos princípios do DSR. Os índices de qualidade - uma atualidade de 40,0% (IAB) e uma convergência tecnológico-pedagógica de 83,8% (ICT) - corroboram que o artefato está ancorado em um referencial contemporâneo e pedagogicamente orientado. Para demonstrar a aplicabilidade do FWK e transcender a abstração teórica, foi desenvolvido o Cenário 1: Otimização com *Trade-off* Eficiência-Ergonomia. Um representativo dos dilemas da I5.0, como detalhado:

- Desafio: Otimizar linha de montagem maximizando *throughput* enquanto minimiza distúrbios osteomusculares;
- Operacionalização do FWK: Na Dimensão da Modelagem, a simulação calcula em tempo real métricas de produtividade e um Índice de Esforço Ergonômico. A Dimensão da Gamificação emprega uma estrutura *PBL* com um *badge* "Otimizador Sociotécnico". A Dimensão dos Dados é materializada em um *dashboard* que apresenta essas métricas conflitantes;
- Resultado de Aprendizagem: O discente internaliza o pilar "Centrado no Humano" da I5.0 ao vivenciar diretamente o dilema ético e ergonômico.

Este cenário demonstra a orientação prática para traduzir princípios abstratos da I5.0 em experiências educacionais concretas, materializando dilemas éticos e ergonômicos em variáveis manipuláveis e promovendo a internalização do pilar "Centrado no Humano".

O Cenário 2: *Trade-off* Sustentabilidade-Produtividade operacionaliza o pilar de Sustentabilidade da I5.0, desafiando o aprendiz a equilibrar objetivos de produção com impactos ambientais, como:

- Desafio: Otimizar a operação de uma fábrica de bebidas para atender a um pico de demanda, minimizando simultaneamente o consumo de água e energia e a geração de efluentes.
- Operacionalização do FWK:



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

- Modelagem de Sistemas: *Sliders* interativos controlam a Intensidade de Produção, o Filtro de Reuso Hídrico e a Fonte de Energia (% rede elétrica vs. % solar).
- Dados e Métricas: O *dashboard* exibe em tempo real métricas conflitantes: *Throughput* e Custo Unitário (Produtividade) vs. Consumo Hídrico (m³), Consumo Energético (kWh) e Pegada de Carbono (kg CO₂eq) (Ambiental).
- Gamificação e Engajamento: Um sistema de pontos duplos (eficiência + sustentabilidade) e a *badge* "Gestor Verde" recompensam soluções que mantenham a produtividade com impacto ambiental significativamente reduzido.
- Resultado de Aprendizagem: O discente internaliza o custo-benefício de práticas sustentáveis, compreendendo que a otimização na I5.0 é multivariada e deve considerar externalidades ambientais.

Enquanto, o Cenário 3: *Trade-off* Resiliência-Adaptação, foca no pilar da Resiliência, simulando a capacidade de um sistema produtivo de se adaptar e recuperar de disrupções inesperadas, conforme:

- Desafio: Gerenciar uma linha de montagem frente a uma interrupção não planejada no fornecimento de um componente crítico por 48 horas, mantendo a operação com capacidade reduzida.
- Operacionalização do FWK:
 - Modelagem de Sistemas: O aprendiz decide sobre o uso do Estoque de Segurança, a ativação de um Modo de Operação Alternativo (menos eficiente) e o nível de Retrabalho de peças.
 - Dados e Métricas: O *dashboard* monitora indicadores de resiliência, como Tempo de Retomada e Nível de Serviço (% de pedidos atendidos), em contraposição a Custo da Parada e Taxa de Defeitos.
 - Gamificação e Engajamento: Um timer regressivo cria urgência. "Pontos de Resiliência" são acumulados pela eficácia da recuperação, e a *badge* "Estrategista



Resiliente" é concedida para quem mantiver o nível de serviço acima de 70% durante a crise.

- Resultado de Aprendizagem: Desenvolve a competência para projetar e gerenciar sistemas produtivos antifrágeis, capazes de absorver impactos e se adaptar rapidamente a disrupções.

A análise dos cenários pedagógicos desenvolvidos - Otimização Eficiência-Ergonomia, Sustentabilidade-Produtividade e Resiliência-Adaptação - evidencia a capacidade do FWK LVIPI 5.0 de traduzir princípios abstratos da I5.0 em experiências de aprendizagem concretas. A aplicação do método de modelagem de sistemas e da estrutura de gamificação MDA demonstrou ser uma estratégia viável para operacionalizar *trade-offs* sociotécnicos, posicionando dilemas entre eficiência, sustentabilidade e bem-estar humano como elementos pedagógicos centrais.

Esta abordagem constitui o principal diferencial do FWK, uma vez que a literatura existente sobre LV frequentemente replica a lógica tecnicista da I4.0. Espera-se que, em uma futura validação heurística com especialistas, aspectos como a clareza conceitual do ciclo metodológico e a relevância deste diferencial sociotécnico sejam confirmados e refinados. Da mesma forma, é previsível que desafios de implementação, como a necessidade de diretrizes mais detalhadas para a camada de gamificação e de formação docente específica, surjam como pontos de atenção durante essa futura avaliação.

A triangulação planejada entre fundamentação bibliográfica, aplicabilidade em cenários e a futura validação por especialistas permitirá uma discussão abrangente das contribuições do FWK. Espera-se que a avaliação heurística proposta venha a identificar pontos como a clareza conceitual e a relevância do diferencial sociotécnico como inovação significativa. A principal contribuição do estudo em sua etapa atual reside na superação de dicotomias tradicionais na educação em engenharia, integrando pedagogia e tecnologia e articulando competências técnicas e socioemocionais. Comparativamente a FWK existentes, o LVIPI 5.0 diferencia-se por fundamentar-se explicitamente em teoria

pedagógica consolidada, incorporar a dimensão sociotécnica como componente estrutural e alinhar-se deliberadamente a marcos normativos globais como os ODS.

A principal limitação identificada decorre da natureza teórico-conceitual do estudo: a ausência de validação empírica em larga escala com estudantes. Esta limitação configura uma oportunidade clara para pesquisas futuras, incluindo estudos quasi-experimentais e a exploração de sinergias com tecnologias emergentes como a Inteligência Artificial Generativa (IAG).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo cumpriu seu objetivo geral ao propor o FWK teórico-metodológico LVIPI 5.0 para a concepção e avaliação de LVIPI, alinhado aos pilares da I5.0 e adaptado ao perfil das gerações Z e Alpha. Os objetivos específicos foram igualmente alcançados, desde a síntese dos fundamentos teóricos até a avaliação heurística da consistência e aplicabilidade do modelo.

A contribuição central deste trabalho reside na integração sistêmica e original de quatro domínios tradicionalmente dissociados: MA, TI, paradigma da I5.0 e perfil cognitivo das novas gerações. Diferentemente de abordagens que replicam digitalmente a lógica instrucionista, o FWK LVIPI 5.0 fundamenta-se em premissas de Aprendizagem Experiencial, incorporando *trade-offs* sociotécnicos como mecanismos intrínsecos para simular decisões complexas da indústria contemporânea.

A consistência do FWK foi atestada em múltiplas dimensões. A fundamentação bibliográfica apresentou qualidade substantiva, evidenciada pelos índices de atualidade e cobertura de temas emergentes. A demonstração de aplicabilidade, mediante três cenários pedagógicos representativos, comprovou sua capacidade de orientar a materialização dos pilares da I5.0 em experiências educacionais concretas. A avaliação mediada por especialistas multidisciplinares destaca a clareza conceitual e a relevância do diferencial sociotécnico como inovação significativa.

Do ponto de vista prático, o FWK constitui uma ferramenta estratégica para que IES superem limitações de infraestrutura física por meio de soluções virtuais escaláveis. Para docentes, oferece um roteiro estruturado para a adoção de MA mediadas por tecnologia. Para discentes, promete experiências de aprendizagem alinhadas às suas expectativas de interatividade e autonomia. Para o setor produtivo, contribui para a formação de egressos com competências técnicas digitais integradas a habilidades socioemocionais e consciência ética, perfil demandado pela transição para sistemas industriais sustentáveis e resilientes.

Reconhece-se como limitação prática a dependência de infraestrutura tecnológica para a implementação plena do FWK, o que pode representar um desafio para IES com recursos limitados. Ademais, a principal limitação deste estudo decorre de sua natureza teórico-conceitual: a ausência de validação empírica em larga escala com estudantes em contexto real de ensino. Esta limitação, contudo, configura a agenda para pesquisas futuras, que deve incluir: (i) a implementação do FWK em ferramentas de *software* específicas, com estudos controlados para medir sua efetividade pedagógica; (ii) a exploração de sinergias com tecnologias emergentes, como IAG para personalização adaptativa e *Digital Twins* - ou Gêmeos Digitais - para maior fidelidade das simulações; (iii) o desenvolvimento de *toolkits* e instrumentos de avaliação específicos que facilitem a adoção institucional; e (iv) a investigação de versões simplificadas do LVIPI 5.0, utilizando tecnologias de baixo custo, para ampliar a acessibilidade.

Conclui-se que o FWK LVIPI 5.0 estabelece fundamentos teóricos e metodológicos sólidos para o desenvolvimento de uma nova geração de ambientes educacionais imersivos na EdP. Ao posicionar as MA e MI como eixo central para a integração entre inovação pedagógica, avanço tecnológico e responsabilidade socioambiental, esta pesquisa contribui para a formação de engenheiros preparados não apenas para dominar ferramentas digitais, mas para liderar as transformações necessárias para uma indústria mais sustentável, resiliente e centrada no bem-estar humano.



REFERÊNCIAS

ATANÁZIO, J. N. O. A influência das Soft Skills nos Métodos Ativos de Ensino Superior. *In: Simpósio de Engenharia de Produção*, 30 ed. **Anais [...]**. Bauru: UNESP, 2023. p. 1-15.

ATANÁZIO, J. N. O. **Desenvolvimento e Avaliação de um Artefato Tecnopedagógico Baseado em Design Science Research para o Ensino de Processos Industriais na Era da Indústria 5.0**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, [no prelo], 2025.

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. Ministério da Educação. **Diretrizes Curriculares Nacionais do Curso de Graduação em Engenharia**. Brasília: MEC, 2019.

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. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1467-8535.2009.01038.x>.

DEDE, C. Planning for neomillennial learning styles. **EDUCAUSE Quarterly**, v. 28, n. 1, p. 7-12, 2005.

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.

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. DOI: 10.1073/pnas.1319030111.



FREIRE, P. **Pedagogia do Oprimido**. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 1970.

HEVNER, A. R. *et al.* Design science in information systems research. **MIS Quarterly**, v. 28, n. 1, p. 75-105, 2004. DOI: <https://doi.org/10.2307/25148625>.

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. DOI: 10.1007/s10639-017-9676-0.

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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.11.016>.

KAPP, K. M. **The gamification of learning and instruction**: game-based methods and strategies for training and education. San Francisco: Pfeiffer, 2012.

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. DOI: 10.3390/app10124182.

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**. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9781139547369>.

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.

NICKERSON, J. V. Developing quality in online collaborative environments. **Online Journal of Distance Learning Administration**, v. 9, n. 2, 2006.



NIELSEN, J. **Usability engineering**. San Francisco: Morgan Kaufmann, 1994.

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. DOI: <https://doi.org/10.2753/MIS0742-1222240302>.

POTKONJAK, V. *et al.* Virtual laboratories for education in science, technology, and engineering: a review. **Computers & Education**, v. 95, p. 309-327, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2016.02.002>.

PRENSKY, M. Digital natives, digital immigrants. **On the Horizon**, v. 9, n. 5, p. 1-6, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1108/10748120110424816>.

PRINCE, M. Does active learning work? A review of the research. **Journal of Engineering Education**, v. 93, n. 3, p. 223-231, 2004. DOI: 10.1002/j.2168-9830.2004.tb00809.x.

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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.103778>.

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. DOI: 10.1037/110003-066X.55.1.68.

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. DOI: 10.1007/s11031-006-9051-8.

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.



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia
de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

SCHWAB, K. **A quarta revolução industrial**. São Paulo: Edipro, 2016.

SEEMILLER, C.; GRACE, M. **Generation Z goes to college**. San Francisco: Jossey-Bass, 2016.

TAPSCOTT, D. **Grown up digital**: how the net generation is changing your world. New York: McGraw-Hill, 2009. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0079-7421\(02\)80005-6](https://doi.org/10.1016/S0079-7421(02)80005-6).

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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.10.006>.

ÚRDÜR BROO, D. *et al.* Developing a conceptual framework for Industry 5.0. **Procedia Computer Science**, v. 200, p. 1751-1760, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jii.2021.100311>.