



03 a 05 de dezembro de 2025

As Engenharias na Transformação Digital das PMEs

Desenvolvimento e Avaliação de um Artefato Tecno-Pedagógico Baseado em Design Science Research para o Ensino de Processos Industriais na Era da Indústria 5.0

José Neilson de Oliveira Atanázio

Departamento de Engenharia de Produção - Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Mariana Rodrigues de Almeida

Departamento de Engenharia de Produção - Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Hélio Roberto Hekis

Departamento de Engenharia de Produção - Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Resumo: O ensino de Engenharia de Produção enfrenta o duplo desafio de alinhar a transformação digital com a formação de profissionais para uma indústria mais sustentável e centrada no humano, conforme preconizado pela Indústria 5.0, e de atender às demandas por abordagens pedagógicas interativas e experiências das gerações Z e Alpha. Diante da lacuna entre a formação prática tradicional e essas novas exigências, este artigo tem como objetivo desenvolver e avaliar um Laboratório Virtual Interativo de Processos Industriais como um artefato tecno-pedagógico alinhado à Indústria 5.0 e às Metodologias Ativas. A metodologia seguiu a abordagem Design Science Research, que envolveu revisão sistemática da literatura, definição de uma arquitetura tecnológica (React.js, Node.js, MongoDB) e a proposta de um framework pedagógico experiencial. Como principais resultados, apresenta-se a proposição conceitual de arranjos físicos e virtuais progressivos e um modelo de validação misto (avaliação heurística e estudo com usuários). Por se tratar de uma pesquisa teórico-propositiva, o artefato e seu modelo de validação são apresentados como uma contribuição fundamentada para orientar o desenvolvimento e a validação empírica futuros, preenchendo uma lacuna identificada na literatura sobre o design de ambientes de aprendizagem para a engenharia do futuro.

Palavras-chave: Design Science Research, Ensino de Engenharia, Indústria 5.0, Laboratório Virtual, Metodologias Ativas.

Development and Evaluation of a Techno-Pedagogical Artifact Based on Design Science Research for Teaching Industrial Processes in the Industry 5.0 Era

Abstract: Production Engineering education faces the dual challenge of aligning digital transformation with the training of professionals for a more sustainable and human-centric industry, as advocated by Industry 5.0, and meeting the demands for interactive and experiential pedagogical approaches from Generations Z and Alpha. Given the gap between traditional practical training and these new requirements, this article aims to develop and evaluate an Interactive Virtual Laboratory for Industrial Processes as a techno-pedagogical artifact aligned with Industry 5.0 and Active Learning Methodologies. The methodology followed the Design Science Research approach, which involved a systematic literature review, the definition of a technological architecture (React.js, Node.js, MongoDB), and the proposal of an experiential pedagogical framework. The main results include the conceptual proposition of progressive physical and virtual arrangements and a mixed

validation model (heuristic evaluation and user study). As a theoretical-propositional research, the artifact and its validation model are presented as a well-founded contribution to guide future development and empirical validation, filling a gap identified in the literature on the design of learning environments for the engineering of the future.

Keywords: Design Science Research, Engineering Education, Industry 5.0, Virtual Laboratory, Active Learning.

1. Introdução

O ensino de Engenharia de Produção (EdP) enfrenta um duplo desafio na contemporaneidade: a necessidade de acompanhar a aceleração da transformação digital e a urgência de formar profissionais aptos a liderar a transição para um paradigma industrial mais sustentável e centrado no ser humano. A Quinta Revolução Industrial (Indústria 5.0) amplia o escopo da Indústria 4.0, colocando a tecnologia a serviço da resiliência, da sustentabilidade e do bem-estar humano, em vez de simples ganhos de eficiência (XU *et al.*, 2021).

Paralelamente a essa transformação do setor produtivo, o perfil discente nas salas de aula universitárias evoluiu de modo significativo. As gerações Z (nascidos entre 1995-2010) e Alpha (pós-2010), enquanto 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 de aprendizagem demandam experiências educacionais imersivas, personalizadas e gamificadas, alinhadas às premissas das Metodologias Ativas de Ensino (MAE).

A formação prática em EdP, tradicionalmente dependente de laboratórios físicos, esbarra em obstáculos significativos. Os custos elevados de equipamentos, a necessidade de manutenção especializada e a rápida obsolescência tecnológica tornam essa abordagem cada vez menos viável para muitas instituições (POTKONJAK *et al.*, 2016). As limitações orçamentárias, restrições espaciais e a necessidade de ensino remoto ou híbrido evidenciam a urgência de soluções virtuais escaláveis que mantenham a qualidade do ensino prático. Essa necessidade é reforçada pelas diretrizes da Resolução CNE/CP nº 2 (BRASIL, 2019), que apontam para a integração de tecnologias digitais na formação docente e para a superação de barreiras estruturais no sistema educacional.

Diante desse cenário, identifica-se o problema central desta investigação: como desenvolver e validar uma solução tecnológica educacional que integre os princípios da Indústria 5.0, as Metodologias Ativas de Ensino e as características de aprendizagem das gerações digitais para potencializar o ensino de processos industriais?

O objetivo deste artigo é apresentar o desenvolvimento e a avaliação de um Laboratório Virtual Interativo de Processos Industriais (LVIPI) como artefato de metodologia ativa para o processo de ensino e aprendizagem de processos produtivos, alinhado aos pilares de sustentabilidade e centralidade humana da Indústria 5.0 (I5.0) e adaptado ao perfil de aprendizagem das gerações Z e Alpha.

Para atingir este objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Sistematizar um referencial teórico integrado sobre Indústria 5.0, Metodologias Ativas, o perfil do aprendiz contemporâneo e tecnologias educacionais imersivas;
- b) Projetar a arquitetura tecnológica e definir os requisitos funcionais do artefato LVIPI;
- c) Desenvolver um *framework* pedagógico experiencial e uma tipologia de arranjos físicos e virtuais progressivos para simulação de processos industriais;

d) Propor um modelo de validação robusto para avaliar a usabilidade, a eficácia pedagógica e o engajamento promovido pelo artefato.

A pesquisa adota o paradigma metodológico Design Science Research (DSR), seguindo o ciclo iterativo proposto por Peffers *et al.* (2007), que compreende as fases de identificação do problema, definição de objetivos, projeto e desenvolvimento, demonstração, avaliação e comunicação dos resultados. É importante ressaltar que este trabalho possui uma natureza teórico-propositiva. Seus principais resultados consistem no *design* e na fundamentação de um artefato inovador (o LVIPI) e em um plano detalhado para sua validação, constituindo uma contribuição para a base de conhecimento da área e uma diretriz para implementações futuras.

Este artigo está organizado em cinco seções. A primeira seção introduz o tema, contextualiza o problema de pesquisa e apresenta seus objetivos. A segunda seção constrói a fundamentação teórica, integrando os pilares da I5.0, das Metodologias Ativas, do perfil do aprendiz contemporâneo e do potencial das tecnologias imersivas. A terceira seção detalha a metodologia, baseada no paradigma da DSR, e o modelo de validação proposto para o artefato. A quarta seção apresenta e discute os principais resultados, que consistem na proposição do artefato LVIPI - incluindo sua arquitetura tecnológica, *framework* pedagógico e uma tipologia de arranjos físicos e virtuais -, bem como a análise de sua viabilidade com base em revisão bibliométrica e casos análogos. Por fim, a quinta seção expõe as considerações finais, com as contribuições, limitações e perspectivas para pesquisas futuras.

2. Fundamentação teórica

O desenvolvimento de um artefato inovador, como o LVIPI, requer uma base teórica sólida e integrada que justifique sua concepção e antecipe sua utilidade. Esta fundamentação articula-se em torno de quatro eixos inter-relacionados: a evolução do paradigma industrial, a resposta pedagógica das Metodologias Ativas, o perfil do novo aprendiz e o potencial habilitador das tecnologias imersivas. O diálogo entre esses eixos não apenas define o espaço do problema - a inadequação dos modelos de ensino prático tradicionais - mas também fornece os princípios de design para a solução proposta.

2.1 A Transição para a Indústria 5.0

A emergência da I5.0 representa uma transição significativa em relação ao foco tecnicista da Indústria 4.0. Seu cerne desloca-se da simples eficiência operacional para uma visão que coloca a tecnologia a serviço da sustentabilidade, da resiliência e do bem-estar humano (COMISSÃO EUROPEIA, 2021; XU *et al.*, 2021). Este alinhamento é intrínseco à Agenda 2030 da ONU e seus Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), em especial o ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura), que preconiza a industrialização inclusiva e sustentável. Este novo paradigma exige um profissional com capacidade de análise sistêmica, apto a tomar decisões em contextos complexos onde é necessário ponderar *trade-offs* entre produtividade, impacto ambiental (relacionado ao ODS 12 - Consumo e Produção Responsáveis) e fatores ergonômicos (LONGO *et al.*, 2020). A formação desse engenheiro, não pode se limitar à transmissão de conhecimentos técnicos. Surge, assim, a necessidade premente de ambientes de aprendizagem que permitam a experimentação segura desses dilemas sociotécnicos, preparando os estudantes para atuar como agentes da transição para um desenvolvimento sustentável, contribuindo diretamente para o alcance dos ODS.

2.2 Metodologias Ativas e Aprendizagem Experiencial como Resposta Pedagógica

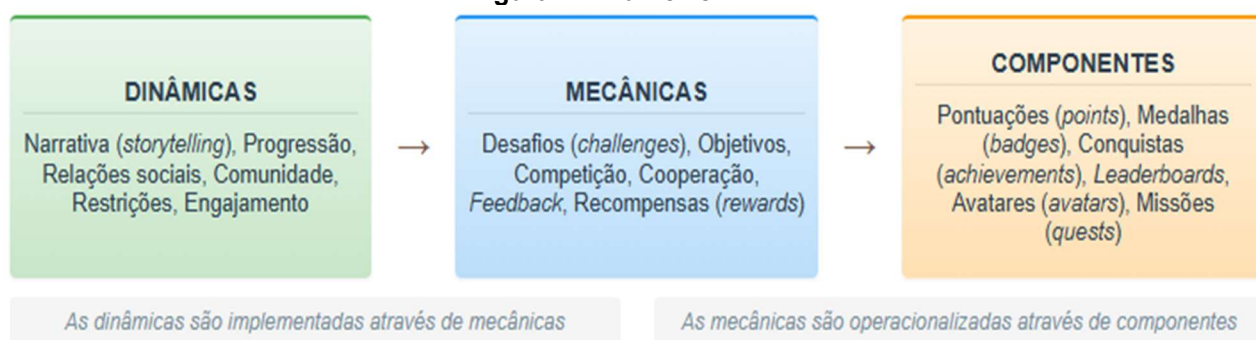
Para atender à demanda por uma formação mais complexa e crítica, as MAE posicionam-se como a resposta pedagógica mais aderente. Esta abordagem está em sintonia com o ODS 4 (Educação de Qualidade), que visa garantir uma educação inclusiva, equitativa e de qualidade e promover oportunidades de aprendizagem ao longo da vida para todos. Fundamentadas no princípio do *Learning by Doing* (DEWEY, 1916) e no ciclo de aprendizagem experiencial de Kolb (1984), que pode ser operacionalizado da seguinte forma: inicia-se pela Experiência Concreta, na qual o sujeito participa de atividades práticas, como a interação com simuladores educacionais; em seguida, ocorre a Observação Reflexiva, momento dedicado à análise crítica e à reflexão sobre os resultados obtidos; posteriormente, desenvolve-se a Conceptualização Abstrata, etapa em que são formulados conceitos e princípios teóricos a partir das experiências vividas; e, por fim, realiza-se a Experimentação Ativa, caracterizada pela aplicação dos conhecimentos adquiridos e pela testagem de novas hipóteses em contextos práticos. A opção pela metodologia DSR é coerente com este eixo, pois o LVIPI é concebido como o artefato que operacionaliza esses princípios, atuando como uma ferramenta para a promoção de uma educação de qualidade (ODS 4), mais alinhada com as demandas do século XXI.

2.3 O Perfil das Gerações Z e Alpha e o Potencial das Tecnologias Imersivas

A efetividade de qualquer intervenção educacional está intrinsecamente ligada ao seu alinhamento com o perfil do aprendiz. As gerações Z e Alpha, enquanto nativos digitais, consomem informação de forma não linear, valorizam a interatividade, a colaboração e o *feedback* imediato (PRENSKY, 2001; SEEMILLER; GRACE, 2016). Suas características cognitivas demandam *agency* (controle sobre a aprendizagem), reconhecida como um elemento-chave para a efetividade da aprendizagem personalizada (ZHANG *et al.*, 2020), bem como experiências multimodais e contextualizadas, elementos com os quais o ensino tradicional frequentemente não consegue dialogar. Neste contexto, as tecnologias imersivas, notadamente os laboratórios virtuais, surgem como veículos ideais.

Os laboratórios virtuais superam limitações de custo, segurança e escalabilidade dos laboratórios físicos (POTKONJAK *et al.*, 2016) e, quando projetados com intencionalidade pedagógica, permitem criar ambientes seguros para a exploração e o erro, fundamentais para a aprendizagem experiencial (JENSEN; KONRADSEN, 2018; RADIANTI *et al.*, 2020). Estratégias de gamificação, baseadas em *frameworks*, ilustrado na Figura 1, como o *Mechanics, Dynamics, Aesthetics* - MDA (HUNICKE *et al.*, 2004), e na Teoria da Autodeterminação (DECI; RYAN, 2000), potencializam o engajamento ao atender às necessidades de autonomia, competência e relacionamento desses alunos (KAPP, 2012), sendo o *feedback* imediato um dos fatores críticos para a eficácia dessas intervenções (HATTIE; TIMPERLEY, 2007). Como detalhado na seção de Metodologia, a arquitetura e a interface do LVIPI foram delineadas a partir desses princípios, incorporando elementos de *game design*, *feedback* rico e personalização para ressoar com esse perfil.

Figura 1 - Framework MDA



Fonte: Adaptado de Atanázio *apud* Hunicke *et al.* (2004)

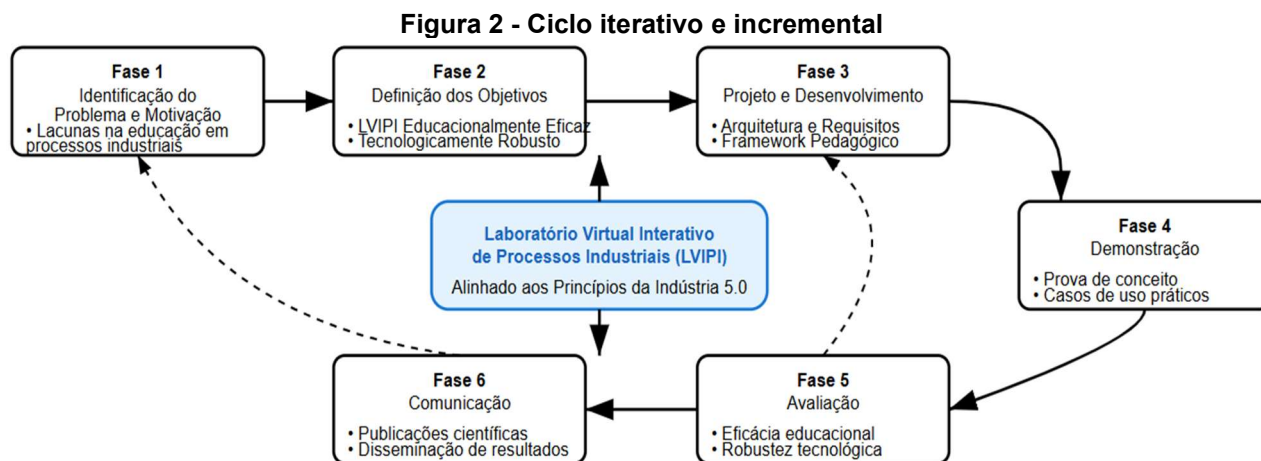
Os exemplos de aplicação do MDA, incluem: a Dinâmica de Progressão, associada à mecânica de desafios e ao componente visual da barra de progresso; a Dinâmica de Competição, que se articula com a mecânica de comparação e é representada pelo componente de *ranking* (*leaderboard*); e a Dinâmica de Reconhecimento, vinculada à mecânica de recompensas e expressa por meio dos emblemas (*badges*).

2.4 Síntese Integradora: Articulando os Pilares para o Design do LVIPI

A fundamentação apresentada configura uma teia de conceitos interligados que define o *design* do artefato, alinhando-se à perspectiva de que intervenções educacionais inovadoras requerem a integração sistêmica entre conteúdo, pedagogia, tecnologia e contexto (MISHRA; KOEHLER, 2006). Dessa forma: A I5.0 e os ODS definem o “porquê” e o “o quê” (a finalidade social e os conteúdos); As MAE definem o “como” (a estratégia pedagógica); O perfil do aprendiz define o “para quem”; e as tecnologias imersivas fornecem o “com o quê”. O LVIPI, posiciona-se não apenas como uma ferramenta educacional, mas como um vetor para a operacionalização de princípios éticos e sustentáveis (I5.0/ODS) na formação profissional, utilizando métodos pedagógicos comprovados e tecnologias contemporâneas. Esta articulação confere ao artefato uma relevância que transcende o ambiente acadêmico, projetando-o para o âmbito do desenvolvimento social e sustentável.

3. Metodologia

Esta pesquisa adotou o paradigma da Design Science Research como metodologia central, por ser adequada para a concepção, desenvolvimento e avaliação de artefatos inovadores destinados a resolver problemas práticos e relevantes identificados em um contexto real (HEVNER *et al.*, 2004; PEFFERS *et al.*, 2007). O artefato em questão é o LVIPI. A operacionalização da pesquisa seguiu o ciclo iterativo proposto por Peffers *et al.* (2007), conforme ilustrado na Figura 2.



Fonte: Adaptado de Atanázio *apud* Peffers *et al.* (2007)

3.1 Ciclo de Desenvolvimento do Artefato

a) Identificação do Problema: A motivação inicial partiu da inadequação dos laboratórios físicos tradicionais e das metodologias de ensino passivas para desenvolver as competências complexas demandadas pela I5.0 e alinhar-se ao perfil de aprendizagem das gerações Z e Alpha, conforme detalhado na introdução;

b) Definição dos Objetivos da Solução: Estabeleceu-se como objetivo desenvolver um LVIPI que fosse: Pedagogicamente eficaz, integrando MAE (PBL e LbD); Tecnologicamente robusto e imersivo; e alinhado aos princípios da I5.0 (sustentabilidade, human-centricidade);

c) Projeto e Desenvolvimento (*Design & Development*): Esta fase envolveu a materialização do artefato por meio de ciclos iterativos:

- Arquitetura do Sistema: O LVIPI foi desenvolvido como uma *Single-Page Application* (SPA) com uma arquitetura em três camadas: Front-end com React.js e Three.js para a interface 3D interativa; *Back-end* com Node.js para a lógica de negócio e simulação; e, Camada de Dados com MongoDB para persistência;
- *Design* Instrucional: Foram projetados cenários pedagógicos alinhados aos pilares da I5.0, incorporando elementos de gamificação (sistema de missões, *badges*, *feedback* imediato) baseados no *framework* MDA;
- Desenvolvimento Iterativo: Inicialmente a construção do artefato passou por protótipos de baixa e alta fidelidade, permitindo refinamentos contínuos;

d) Demonstração: Um protótipo funcional do LVIPI estabeleceu-se em cenários de uso específicos, como a otimização de uma linha de montagem considerando *trade-offs* entre eficiência e ergonomia.

3.2 Modelo de Validação Proposto para o Artefato

Para validar o artefato LVIPI quando de sua implementação futura, estruturou-se um modelo de validação composto por duas etapas sequenciais e complementares, que utilizará uma abordagem de métodos mistos. Este modelo foi detalhado para assegurar o rigor da futura avaliação empírica.

a) Avaliação Heurística com Especialistas (Avaliação Formativa): Está planejada a condução de uma avaliação com um painel multidisciplinar de especialistas (das áreas de EdP, Tecnologia Educacional, *Design* Instrucional e Indústria). O protótipo será avaliado com base em um *checklist* heurístico adaptado (NIELSEN, 1994) que incorporará critérios de usabilidade, qualidade pedagógica e aderência à I5.0. Os dados qualitativos serão analisados por meio de Análise de Conteúdo Temática (BARDIN, 2011), fornecendo *insights* para um eventual refinamento do artefato antes do estudo com usuários.

b) Estudo Piloto com Usuários (Avaliação Somativa): Propõe-se a realização de um estudo de caso instrumental (STAKE, 1995) com um grupo de estudantes de graduação em EdP. O procedimento incluirá pré e pós-testes para medir a aquisição de conhecimento declarativo sobre os conceitos abordados. Serão utilizadas as seguintes estratégias: Interação com o LVIPI - os participantes executarão uma tarefa no laboratório virtual, utilizando o protocolo *Think-Aloud* (ERICSSON; SIMON, 1993) para capturar sua experiência em tempo real; Avaliação de Usabilidade - Aplicar-se-á o System Usability Scale (SUS) (BROOKE, 1996) para obter uma medida quantitativa da usabilidade percebida; e Questionário de Percepção - instrumento voltado à avaliação de dimensões subjetivas como engajamento e valor atribuído à experiência.

A análise dos dados combinará estatística descritiva e inferencial (ex.: teste t para amostras dependentes) para os dados quantitativos, e Análise de Conteúdo para os qualitativos, permitindo uma triangulação robusta dos futuros resultados.

A exploração dos dados seguirá uma abordagem de métodos mistos para triangulação dos resultados, detalhada a seguir:

a) Dados Quantitativos: Serão analisados com o auxílio de um software estatístico (ex.: R, SPSS ou JASP).

- Estatística Descritiva: Serão calculadas medidas de tendência central (médias, medianas) e dispersão (desvio padrão) para os escores do System Usability Scale (SUS) e para as notas dos pré e pós-testes.

- Estatística Inferencial: Para verificar a eficácia pedagógica, será utilizado o teste t de *Student* para amostras dependentes (pareado), a fim de comparar as médias dos pré e pós-testes e avaliar se houve um ganho de conhecimento estatisticamente significativo após a interação com o LVIPI. O nível de significância adotado será de $p < 0,05$.

b) Dados Qualitativos: As transcrições dos protocolos *Think-Aloud* serão submetidas à Análise de Conteúdo Temática, conforme proposto por Bardin (2011), seguindo três etapas principais: pré-análise, com leitura flutuante e organização do material; exploração do material, envolvendo codificação e identificação de unidades de significado; e tratamento dos resultados, com o agrupamento dos códigos em categorias temáticas emergentes (ex.: "Dificuldades de Navegação", "Compreensão dos *Trade-offs*", "Engajamento com a Gamificação").

c) Triangulação: Os resultados quantitativos (ex.: score SUS, ganho no pós-teste) serão contrastados e complementados com as categorias qualitativas, permitindo uma interpretação rica e contextualizada dos pontos fortes e fracos do artefato.

4. Resultados e discussões

Esta pesquisa, de natureza bibliográfica e propositiva, pautou-se em uma análise sistemática do estado da arte para fundamentar o desenvolvimento do artefato LVIPI. O principal resultado é a proposição de um modelo tecno-pedagógico integrado, que inclui a arquitetura do laboratório virtual e a especificação de uma série de arranjos físicos e virtuais para simulação de processos industriais.

4.1 Revisão Sistemática e Critérios de Inclusão

A fim de assegurar o rigor teórico e a abrangência da fundamentação, foi conduzida uma análise bibliométrica do *corpus* de 167 referências que compõem o arcabouço teórico desta pesquisa, originalmente desenvolvida no contexto de uma dissertação de mestrado em andamento (ATANÁZIO, 2025). A classificação foi realizada com base nos Critérios de Inclusão (CI) estabelecidos pelo paradigma da DSR: a) (CI01) O *design* e desenvolvimento de laboratórios virtuais ou simuladores para engenharia; b) (CI02) A avaliação de Metodologias Ativas (PBL, LbD) em ambientes virtuais de aprendizagem; e c) (CI03) Estudos sobre os princípios da I5.0 e sua transposição para a educação.

A análise dessa amostra permitiu mapear as melhores práticas e lacunas existentes, consolidando a base para a proposta aqui apresentada. Procedimentos de Cálculo. A classificação não era mutuamente excludente; uma mesma referência poderia ser associada a um, dois ou mesmo aos três critérios simultaneamente, caso sua contribuição assim o justificasse. Dessa forma, o cálculo dos percentuais para cada critério (CI01, CI02, CI03) teve como base o total geral de referências ($N=167$). Por exemplo, o percentual para o CI01 foi calculado como $(97 \div 167) \times 100$; a categoria "Referências com múltiplos critérios" (42) representa uma contagem absoluta de trabalhos classificados em mais de um CI, sendo seu percentual também calculado sobre o total de 167; e esta metodologia explica por que a soma dos percentuais dos três critérios principais ($58,1\% + 18,0\% + 42,5\% = 118,6\%$) ultrapassa 100%, refletindo adequadamente a natureza interdisciplinar e complementar da base bibliográfica. O resumo estatístico dessa análise é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Resumo Estatístico da Classificação das Referências		
Critério	Quantidade	Percentual
CI01 - <i>Design</i> e Desenvolvimento	97	58,1%
CI02 - Avaliação e Validação	30	18,0%
CI03 - Revisão e Contextualização	71	42,5%
Referências com múltiplos critérios	42	25,3%
Referências emergentes incluídas	14	8,4%

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Os percentuais não somam 100% devido à possibilidade de múltiplos critérios por estudo. Diante disso, a análise revela uma distribuição estratégica e metodologicamente consistente. A predominância do CI01 (*Design* e Desenvolvimento), com 97 referências (58,1%), demonstra o foco prioritário na criação de artefatos e soluções inovadoras, alinhando-se à natureza propositiva da DSR. O CI03 (Revisão e Contextualização), com 71 referências (42,5%), fornece a base sólida que fundamenta a relevância e identifica as lacunas do problema de pesquisa. Já o CI02 (Avaliação e Validação), com 30 referências (18,0%), assegura que o artefato proposto está ancorado em métodos consagrados de teste e validação. A significativa presença de referências classificadas em múltiplos critérios (25,3%) atesta a interdisciplinaridade da base teórica. Esta análise quantitativa corrobora a solidez da fundamentação que sustenta esta pesquisa.

A análise do artefato LVIPI, enquanto produto dessa fundamentação sistemática, revela um *design* intencionalmente alinhado aos pilares teóricos da I5.0, das Metodologias Ativas e das características das gerações Z e Alpha. O artefato se distingue por traduzir princípios abstratos em funcionalidades concretas. Enquanto a literatura aponta que laboratórios virtuais tradicionais frequentemente se limitam à simulação técnica de eficiência (POTKONJAK *et al.*, 2016), o LVIPI avança ao incorporar explicitamente a ponderação de *trade-offs* sustentáveis e a centralidade no humano, materializando os princípios da I5.0 (XU *et al.*, 2021) que criticam o foco exclusivo na produtividade. Esta materialização dos conceitos em um ambiente virtual interativo constitui a principal contribuição prática do estudo, oferecendo um modelo aplicável para a criação de experiências de aprendizagem que preenchem a lacuna identificada entre a simulação técnica e a formação sociotécnica necessária para o engenheiro do futuro.

Paralelamente, a robustez do modelo de validação proposto, detalhado na seção metodológica, assegura que a eficácia do LVIPI poderá ser mensurada com rigor quando de sua implementação futura. A combinação planejada de métodos mistos - da avaliação heurística com especialistas ao estudo piloto com usuários, utilizando instrumentos consagrados como o SUS e protocolos qualitativos - fornece um caminho metodológico claro e replicável. Com base na literatura, é possível projetar que a aplicação deste modelo tem o potencial de gerar evidências robustas sobre a usabilidade, a capacidade de promover engajamento e a eficácia pedagógica do artefato, validando empiricamente as premissas teóricas que fundamentaram o seu desenvolvimento.

4.2 Proposição dos Arranjos Físicos e Virtuais para o LVIPI

Um dos resultados concretos desta análise bibliográfica foi o desenvolvimento de uma tipologia de arranjos físicos e virtuais, que servirão como cenários de aprendizagem no LVIPI. Estes arranjos foram concebidos para evoluir em complexidade, alinhando-se ao ciclo de aprendizagem experiencial. Para fins de exemplificação e escopo deste artigo, será detalhado o primeiro destes arranjos, sendo os demais apresentados integralmente na dissertação que origina este trabalho:

a) Arranjo Físico Simples (AFS): Projetado para introduzir conceitos básicos de layout e fluxo. Este arranjo propositalmente simplificado responde a uma crítica comum a ambientes de simulação complexos, que podem sobrecarregar o aprendiz iniciante (JENSEN; KONRADSEN, 2018). Diferente de simuladores que começam com alta complexidade, o AFS visa construir confiança e compreensão de relações de causa e efeito fundamentais em um ambiente de risco zero, operacionalizando o princípio de *scaffolding* (estratégias educacionais) das MAE. (Ver Anexo A - Modelo de Arranjo Físico).

b) Arranjo Físico por Produto (AFP): Foca na montagem de um produto específico, agrupando equipamentos e recursos necessários para sua fabricação. Este arranjo permite explorar conceitos de especialização e eficiência em linhas dedicadas.

c) Arranjo Físico Linear/Sequencial: Fluxo de Produção em *Design Thinking* (AFL-S): Representa o ápice da complexidade proposta. Inspirado nos princípios do *Design Thinking*, este arranjo simula um fluxo de produção onde o aluno deve equilibrar sequências operacionais com variáveis de sustentabilidade e ergonomia, tomando decisões que afetam múltiplas métricas simultaneamente (ex.: *throughput*, consumo energético, índice de esforço do operador).

A criação desses arranjos é, em si, um resultado significativo, pois operacionaliza teoricamente os princípios das MAE e da I5.0 em ambientes de simulação concretos, indo além de uma discussão conceitual. A discussão centra-se na viabilidade e no potencial impacto da proposição teórica. A análise sistemática da literatura não apenas justificou a necessidade do LVIPI, mas forneceu os parâmetros para o desenho dos seus componentes centrais, os arranjos físicos e virtuais.

4.3 Proposição do Artefato LVIPI e do Seu Modelo de Validação

A discussão da proposta do LVIPI deve considerar um desafio central apontado pela literatura: a dificuldade de transpor princípios pedagógicos avançados, como os das MAE, para ambientes virtuais de forma a promover uma aprendizagem significativa para além do treinamento procedural (SAVIN-BADEN, 2003). A criação dos arranjos físicos e virtuais apresentados é uma resposta direta a esse desafio. Diferente de simuladores que se limitam a replicar operações técnicas, estes arranjos foram concebidos para operacionalizar os princípios da I5.0 e das MAE criando cenários que forçam a reflexão e a tomada de decisão em contextos de *trade-offs* complexos. No entanto, a contribuição vai além da criação de cenários; reside no oferecimento de um modelo de como embedar dimensões socio técnicas e sustentáveis no cerne do *design* de laboratórios virtuais, superando uma lacuna frequentemente apontada nesses artefatos (POTKONJAK *et al.*, 2016).

4.3.1 Evidências Contextuais de Viabilidade

A análise de iniciativas análogas de sucesso oferece evidências contextuais da viabilidade e do potencial de impacto de artefatos como o LVIPI. Dois casos emblemáticos foram analisados:

a) RExLab/UFSC: Esta iniciativa demonstra a viabilidade técnica e pedagógica de laboratórios de experimentação remota e virtual, destacando a superação de barreiras de acesso e a eficácia na oferta de atividades práticas em larga escala. O RExLab valida a premissa de que ambientes virtuais podem ser integrados ao ecossistema educacional de forma sustentável.

b) Projeto *Smart* Metropolis/IMD-UFRN: Este caso evidencia a aplicabilidade bem-sucedida do paradigma de Pesquisa Aplicada e DSR no desenvolvimento de artefatos complexos (plataformas, simuladores) para resolver problemas reais. Sua expertise em tecnologias imersivas e IoT espelha as competências necessárias para a próxima geração de LVs, alinhando-se diretamente com a arquitetura tecnológica proposta para o LVIPI.

A relevância desses casos para esta pesquisa é dupla: eles corroboram a viabilidade operacional e educacional da proposta do LVIPI, indicando que os desafios de implementação são superáveis; e oferecem parâmetros de avaliação e modelos de governança que podem ser adaptados, fortalecendo o argumento de que o artefato aqui proposto está ancorado em experiências concretas e bem-sucedidas.

4.3.2 Discussão da Proposição

A discussão centra-se na viabilidade e no potencial impacto da proposição teórica. A análise sistemática da literatura não apenas justificou a necessidade do LVIPI, mas forneceu os parâmetros para o desenho dos seus componentes centrais, os arranjos físicos e virtuais. Estes arranjos materializam a transição da teoria para a prática simulada, permitindo que

os estudantes vivenciem, em um ambiente de risco zero, os complexos de *trade-offs* na indústria real. A contribuição deste trabalho reside, em preencher uma lacuna de projeto ao oferecer um modelo aplicável. A proposta vai além do diagnóstico, fornecendo uma especificação detalhada de um artefato educacional inovador e um plano metodológico para sua validação empírica futura.

O LVIPI e seus arranjos físicos posicionam-se como uma proposta de ferramenta para operacionalizar na prática educacional os princípios teóricos da I5.0 e das MAE. Com base no alinhamento conceptual realizado e em experiências análogas bem-sucedidas, projeta-se que ele tenha o potencial de se tornar uma alternativa eficaz para a formação dos engenheiros que a indústria do futuro demanda, capacitados a lidar com sistemas sociotécnicos complexos. A confirmação dessa eficácia, no entanto, está condicionada à execução do modelo de validação empírica proposto.

Reconhece-se que a validação empírica da eficácia do LVIPI constitui uma etapa futura. No entanto, a validação conceptual alcançada por meio da fundamentação teórica integrada e do design alinhado a *frameworks* consagrados fornece uma indicação robusta de sua viabilidade e potencial impacto, seguindo a lógica de pesquisas do tipo DSR (HEVNER *et al.*, 2004).

5. Considerações finais

Este artigo apresentou a fundamentação e o projeto do Laboratório Virtual Interativo de Processos Industriais, um artefato tecno-pedagógico desenvolvido com base no paradigma da Design Science Research para modernizar o ensino de Engenharia de Produção frente aos desafios da I5.0 e ao perfil das gerações Z e Alpha.

A análise sistemática de 167 referências, categorizadas conforme critérios da DSR, sustentou a construção de um modelo integrado que articula princípios da I5.0, Metodologias Ativas e tecnologias imersivas. Como principal contribuição, propõe-se a arquitetura do LVIPI, um *framework* pedagógico experiencial e uma tipologia de arranjos físicos e virtuais progressivos - como o Arranjo Físico Simples aqui exemplificado -, operacionalizando a simulação de *trade-offs* entre eficiência, sustentabilidade e fator humano.

Reconhece-se como limitação a natureza teórico-propositiva do estudo, sendo a implementação e validação empírica do artefato etapas futuras indispensáveis. Perspectivas de pesquisa incluem: A validação do LVIPI por meio do modelo misto proposto; A expansão dos cenários de simulação para outros domínios da EdP; e Estudos sobre adoção e integração curricular do artefato.

Conclui-se que o LVIPI representa uma contribuição replicável e alinhada com a necessidade de formar engenheiros capazes de atuar em sistemas sociotécnicos complexos, promovendo uma transição para indústrias mais sustentáveis e centradas no ser humano.

Referências

- 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. ISBN: 9788562938047.
- BRASIL. **Resolução CNE/CP nº 2, de 20 de dezembro de 2019**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 23 dez. 2019. Seção 1, p. 43.

BROOKE, J. SUS: A quick and dirty usability scale. In: JORDAN, P. W. *et al.* (Ed.). **Usability evaluation in industry**. London: Taylor and Francis, 1996. p. 189-194. ISBN: 9780429157011.

COMISSÃO EUROPEIA. **Industry 5.0 - Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry**. Bruxelas, 2021. Disponível em: <https://research-and-innovation.ec.europa.eu/knowledge-publications-tools-and-data/publications/all-publications/industry-50-towards-sustainable-human-centric-and-resilient-european-industry_en>. Acesso em: 24 set. 2025.

DECI, E. L.; RYAN, R. M. The "What" and "Why" of Goal Pursuits: Human Needs and the Self-Determination of Behavior. **Psychological Inquiry**, v. 11, n. 4, p. 227-268, 2000. DOI: https://doi.org/10.1207/S15327965PLI1104_01.

DEWEY, J. **Democracy and Education**: An Introduction to the Philosophy of Education. New York: Macmillan, 1916.

ERICSSON, K. A.; SIMON, H. A. **Protocol analysis: Verbal reports as data**. Cambridge: MIT press, 1993. DOI: <https://doi.org/10.7551/mitpress/5657.001.0001>.

HATTIE, J.; TIMPERLEY, H. The power of feedback. **Review of Educational Research**, v. 77, n. 1, p. 81-112, 2007. DOI: <https://doi.org/10.3102/003465430298487>.

HEVNER, A. R.; MARCH, S. T.; PARK, J.; RAM, S. Design science in information systems research. **MIS Quarterly**, v. 28, n. 1, p. 75-105, 2004. DOI: <https://doi.org/10.2307/25148625>.

HUNICKE, R.; LEBLANC, M.; ZUBEK, R. MDA: A formal approach to game design and game research. In: WORKSHOP ON CHALLENGES IN GAME AI, 2004, San Jose. **Anais...** Menlo Park: AAAI Press, 2004.

IMD. **Smart Metropolis**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Disponível em: <<https://portal.imd.ufrn.br/portal/projeto/1/smart-metropolis>>. Acesso em: 10 set. 2025.

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: <https://doi.org/10.1007/s10639-017-9676-0>.

KAPP, K. M. **The Gamification of Learning and Instruction: Game-based Methods and Strategies for Training and Education**. San Francisco: Pfeiffer, 2012. ISBN: 978-1118096345.

KOLB, D. A. **Experiential learning: experience as the source of learning and development**. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1984. ISBN: 0-132-95261-0.

LONGO, F.; PADOVANO, A.; UMBRELLO, S. 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.

MISHRA, P.; KOEHLER, M. J. Technological Pedagogical Content Knowledge: A framework for teacher knowledge. **Teachers College Record**, v. 108, n. 6, p. 1017-1054, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1467-9620.2006.00684.x>.

NIELSEN, J. **Usability Engineering**. San Francisco: Morgan Kaufmann, 1994. ISBN: 978-0-08-052029-2.

PEFFERS, K.; TUUNANEN, T.; ROTHENBERGER, M. A.; CHATTERJEE, S. 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.; GARDNER, M.; CALLAGHAN, V.; MATTILA, P.; GUETL, C.; PETROVIC, V. M.; JOVANOVIĆ, K. 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 part 1. **On the Horizon**, v. 9, n. 5, p. 1-6, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1108/10748120110424816>.

RADIANTI, J.; MAJCHRZAK, T. A.; FROMM, J.; WOHLGENANT, I. 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>.

REXLAB. **Laboratório de Experimentação Remota**. Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em: <<https://rexlab.ufsc.br>>. Acesso em: 10 set. 2025.

SAVIN-BADEN, M. **Facilitating Problem-Based Learning: Illuminating Perspectives**. Berkshire: SRHE/Open University Press, 2003. ISBN: 978-0335210541.

SEEMILLER, C.; GRACE, M. **Generation Z goes to college**. San Francisco: Jossey-Bass, 2016. ISBN-10: 1-119-14345-4. ISBN-13: 978-1119143451.

STAKE, R. E. **The art of case study research**. Thousand Oaks: SAGE, 1995. ISBN-10: Rolamento 080395767X. ISBN-13: 978-0803957671.

XU, X.; LU, Y.; VOGEL-HEUSER, B.; WANG, L. 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>.

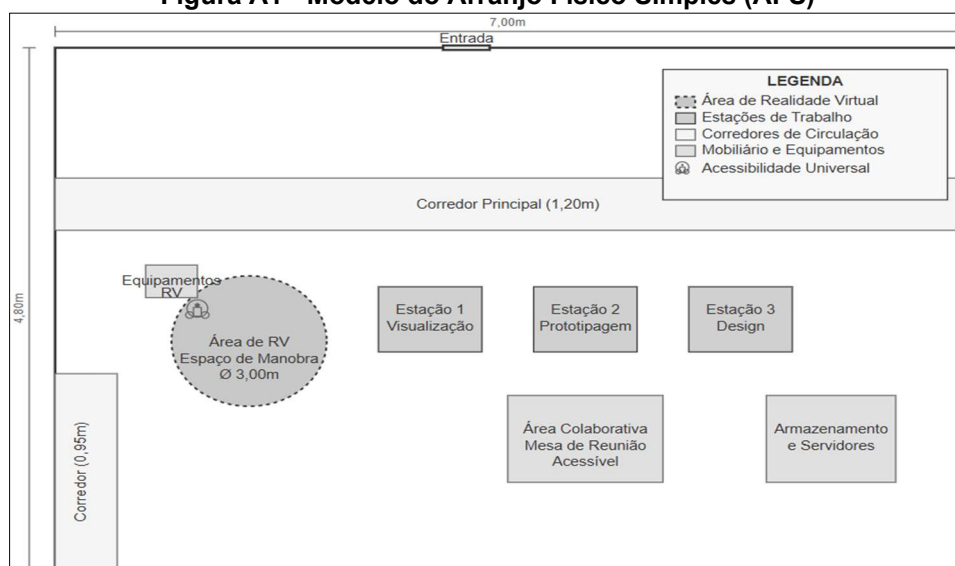
ZHANG, L.; BASHAM, J. D.; YANG, S. Understanding the implementation of personalized learning: A research synthesis. **Educational Research Review**, v. 31, p. 100339, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2020.100339>.

ANEXO

Anexo A - Modelo de Arranjo Físico

Este modelo corresponde a um dos arranjos físicos desenvolvidos no âmbito da dissertação. Os demais modelos - como o Arranjo por Produto, o Arranjo Linear/Sequencial, entre outros - encontram-se detalhados na obra original.

Figura A1 - Modelo do Arranjo Físico Simples (AFS)



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)