



II CIGELUBRA

Congresso Internacional de Gestão e Engenharia Luso-Brasileiro

03 a 05 de dezembro de 2025



estga
universidade
de aveiro

As Engenharias na Transformação Digital das PMEs

Formação do Engenheiro para a Indústria 5.0: Um Laboratório Virtual como Ferramenta de Aprendizagem Experiencial

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: A formação do Engenheiro de Produção no contexto da Indústria 5.0 exige a integração de competências técnicas e sociotécnicas alinhadas aos seus princípios. Este artigo propõe um Laboratório Virtual Interativo de Processos Industriais como ferramenta de aprendizagem experiencial para capacitar estudantes na tomada de decisões sustentáveis e centradas no humano. Com base no paradigma Design Science Research, o artefato incorpora metodologias ativas, gamificação e uma tipologia de arranjos físicos e virtuais progressivos. Os resultados incluem a proposição de um framework pedagógico e um modelo de validação misto. Conclui-se que o LVIPI representa uma contribuição inovadora para a educação em engenharia, preparando futuros profissionais para os complexos desafios da indústria.

Palavras-chave: Aprendizagem Experiencial, Design Science Research, Formação em Engenharia, Indústria 5.0, Laboratório Virtual.

Training Engineers for Industry 5.0: A Virtual Laboratory as an Experiential Learning Tool

Abstract: The education of Production Engineers within the context of Industry 5.0 requires the integration of technical and socio-technical skills aligned with its principles. This article proposes an Interactive Virtual Laboratory for Industrial Processes as an experiential learning tool to train students in sustainable and human-centric decision-making. Based on the Design Science Research paradigm, the artifact incorporates active methodologies, gamification, and a typology of progressive physical and virtual arrangements. The results include the proposition of a pedagogical framework and a mixed validation model. It is concluded that the LVIPI represents an innovative contribution to engineering education, preparing future professionals for the complex challenges of the industry.

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

1. Introdução

A formação do Engenheiro de Produção (EdP) no atual cenário global enfrenta uma necessidade premente de transformação, impulsionada pela emergência da Indústria 5.0 (I5.0). Este novo paradigma industrial amplia o escopo técnico-operacional da Indústria 4.0, colocando a tecnologia a serviço da resiliência, da sustentabilidade e do bem-estar humano (XU *et al.*, 2021). Neste contexto, o profissional deve estar apto a lidar com sistemas

sociotécnicos complexos, ponderando *trade-offs* entre produtividade, impacto ambiental e fatores humanos, atuando como um agente da transição para um desenvolvimento verdadeiramente sustentável.

Paralelamente a esta mudança no setor produtivo, o perfil discente nas salas de aula universitárias é marcado pelas gerações Z e Alpha. Como nativos digitais, estes estudantes 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 *agency* (controle sobre o processo), experiências imersivas e contextualizadas, alinhadas às premissas das Metodologias Ativas de Ensino (MAE).

A formação prática tradicional em EdP, centrada em laboratórios físicos, esbarra em obstáculos significativos para atender a essas novas demandas. Os custos elevados de equipamentos, a necessidade de manutenção especializada e a rápida obsolescência tecnológica tornam essa abordagem pouco viável e escalável 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 inovadoras 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, o problema de pesquisa que orienta este estudo é: como desenvolver e validar um ambiente de aprendizagem experiencial que efetivamente prepare os futuros engenheiros para os desafios sociotécnicos da Indústria 5.0, ressoando com o perfil das novas gerações?

O objetivo central deste artigo é, propor e fundamentar um Laboratório Virtual Interativo de Processos Industriais (LVIPI) como um artefato tecno-pedagógico para a formação de competências alinhadas à Indústria 5.0, utilizando Metodologias Ativas e princípios de gamificação para engajar os estudantes.

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

- a) Sistematizar um referencial teórico integrado sobre a formação do engenheiro para a I5.0, Metodologias Ativas e o perfil do aprendiz contemporâneo;
- b) Projetar a arquitetura tecnológica e 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). É importante ressaltar que este trabalho possui uma natureza teórico-propositiva. Seus principais resultados consistem no *design* e na fundamentação do 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, contextualizando o desafio da formação do engenheiro. A segunda seção constrói a fundamentação teórica, integrando os pilares da I5.0, das Metodologias Ativas, do perfil do aprendiz e do potencial das tecnologias imersivas. A terceira seção detalha a metodologia DSR. A quarta seção apresenta e discute os principais resultados, incluindo a proposição

do artefato LVIPI e sua arquitetura. Por fim, a quinta seção expõe as considerações finais, com contribuições e perspectivas para pesquisas futuras.

2. Fundamentação teórica

O desenvolvimento de um artefato inovador, como o LVIPI, requer uma base teórica sólida que justifique sua concepção e antecipe sua utilidade no contexto da formação do engenheiro. Esta fundamentação articula-se em torno de quatro eixos inter-relacionados: a evolução do paradigma industrial e suas implicações para as competências profissionais, a resposta pedagógica das Metodologias Ativas, o perfil do novo aprendiz e o potencial habilitador das tecnologias imersivas. O diálogo entre esses eixos define o espaço do problema - a inadequação dos modelos de ensino prático tradicionais para a formação do engenheiro do futuro - e fornece os princípios de design para a solução proposta.

2.1 A Indústria 5.0 e o Novo Perfil do Engenheiro

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).

Este novo paradigma exige um profissional com um repertório ampliado, dotado de capacidade de análise sistêmica e apto a tomar decisões em contextos complexos onde é necessário ponderar *trade-offs* entre produtividade, impacto ambiental (relacionado ao ODS 12) e fatores humanos e ergonômicos (LONGO *et al.*, 2020). A formação desse engenheiro não pode se limitar à transmissão de conhecimentos técnicos, devendo incorporar uma visão crítica e ética. 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.

2.2 MAE como Estratégia para Desenvolver Competências Complexas

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). Fundamentadas no princípio do *Learning by Doing* (DEWEY, 1916) e no ciclo de aprendizagem experiencial de Kolb (1984), as MAE transferem o centro do processo do professor para o aluno, promovendo a autonomia, a colaboração e a resolução de problemas reais.

O ciclo de Kolb, que se inicia pela Experiência Concreta (ex.: interagir com um simulador), passa pela Observação Reflexiva (analisar os resultados), avança para a Conceptualização Abstrata (formular conceitos) e culmina na Experimentação Ativa (aplicar o conhecimento em novos contextos), é particularmente adequado para desenvolver as competências exigidas pela I5.0. O LVIPI é concebido como o artefato que operacionaliza esses princípios, criando um ambiente onde o futuro engenheiro pode vivenciar, refletir e aprender com suas decisões em um contexto simulado, porém realista.

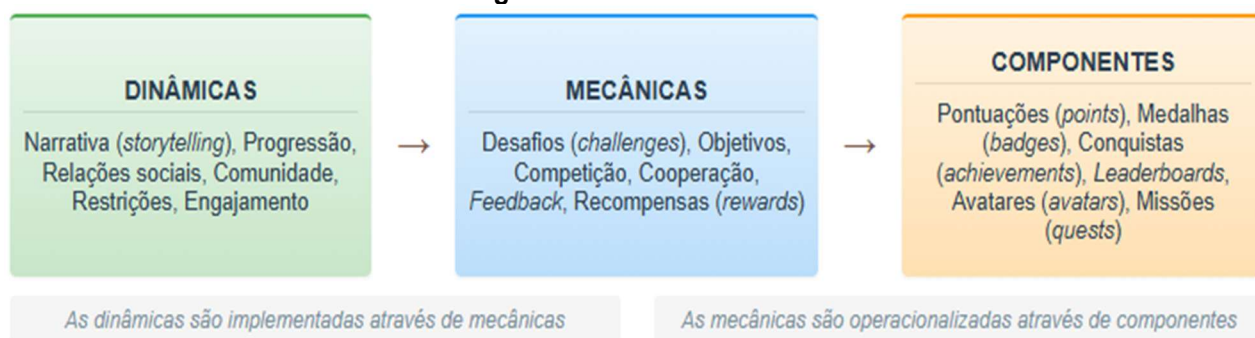
2.3 O Perfil das Gerações Z e Alpha: Alinhando a Aprendizagem ao Público-Alvo

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.

Neste contexto, as tecnologias imersivas, notadamente os laboratórios virtuais, surgem como veículos ideais para engajar esse público. Eles 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). Estratégias de gamificação, baseadas em *frameworks* como o MDA (*Mechanics, Dynamics, Aesthetics*) (HUNICKE *et al.*, 2004) e na Teoria da Autodeterminação (DECI; RYAN, 2000), potencializam o engajamento ao atender às necessidades psicológicas de autonomia, competência e relacionamento (KAPP, 2012). O *feedback* imediato, por sua vez, é um dos fatores críticos para a eficácia dessas intervenções (HATTIE; TIMPERLEY, 2007).

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*).

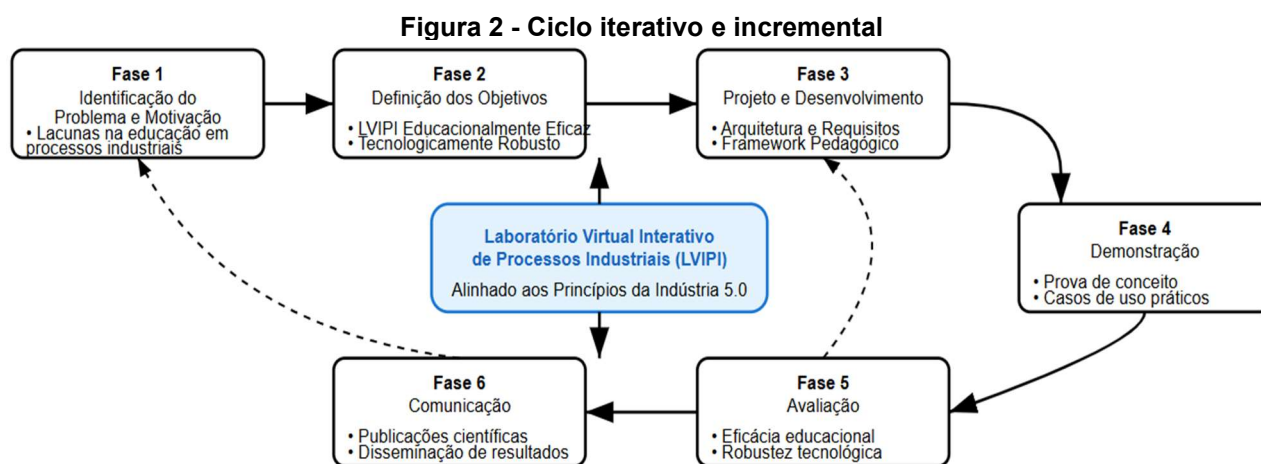
2.4 Síntese Integradora: Articulando os Pilares para o Design do LVIPI

A fundamentação apresentada configura uma teia de conceitos interligados que define o *design* do artefato. Dessa forma: A I5.0 e os ODS definem o "porquê" e o "o quê" (a finalidade social e as competências a serem desenvolvidas); 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 uma formação ética, sustentável e centrada no humano, utilizando métodos pedagógicos comprovados e tecnologias contemporâneas para preparar o engenheiro que a indústria e a sociedade demandam.

3. Metodologia

O paradigma da Design Science Research emergiu no campo dos Sistemas de Informação como uma resposta à necessidade de produzir conhecimento por meio da criação e avaliação de artefatos inovadores que resolvem problemas do mundo real (HEVNER *et al.*, 2004). Diferente de metodologias puramente observacionais ou explicativas, a DSR é orientada à construção (*build and evaluate*) e visa gerar *design knowledge* - princípios válidos e prescritivos para a criação de soluções (PEFFERS *et al.*, 2007; HEVNER, 2007). Este trabalho adota esse paradigma, e o artefato em questão, o LVIPI, é proposto como uma solução para o desafio central de como formar engenheiros com as competências

exigidas pela I5.0. 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 modelos de formação prática tradicional para desenvolver as competências sociotécnicas complexas demandadas pela I5.0, como a capacidade de analisar *trade-offs* entre eficiência, sustentabilidade e fator humano, conforme detalhado na introdução e fundamentação teórica;

b) Definição dos Objetivos da Solução: Estabeleceu-se como objetivo desenvolver um LVIPI que fosse:

- Pedagogicamente Alinhado: Capaz de promover uma formação experiencial por meio de Metodologias Ativas (PBL e LbD);
- Tecnologicamente Robusto e Imersivo: Para engajar o perfil discente atual (gerações Z e Alpha);
- Estruturalmente Coerente com a I5.0: Incorporando explicitamente os princípios de sustentabilidade e centralidade no humano em seus cenários de aprendizagem;

c) Projeto e Desenvolvimento (*Design & Development*): Esta fase envolveu a materialização do artefato por meio de ciclos iterativos, sempre com o foco na sua eficácia como ferramenta de formação:

- Arquitetura do Sistema: O LVIPI foi concebido 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 Instructional*: Foram projetados cenários pedagógicos que materializam os desafios da I5.0, incorporando elementos de gamificação (sistema de missões, *badges*, *feedback* imediato) baseados no *framework* MDA para potencializar o engajamento e a aprendizagem;
- Desenvolvimento Iterativo: A construção do artefato passou por protótipos de baixa e alta fidelidade, permitindo refinamentos contínuos com base no seu potencial educativo;

d) Demonstração: Um protótipo funcional do LVIPI foi estruturado em cenários de uso específicos, como a otimização de uma linha de montagem considerando *trade-offs* entre eficiência e ergonomia, ilustrando sua aplicação direta na formação para a tomada de decisão complexa.

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 da sua eficácia formativa.

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 Instructional* e Indústria). O protótipo será avaliado com base em um *checklist* heurístico adaptado (NIELSEN, 1994) que incorporará critérios de usabilidade, qualidade pedagógica e potencial para desenvolver as competências almejadas 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;
- Questionário de Percepção: instrumento voltado à avaliação de dimensões subjetivas como engajamento e valor atribuído à experiência de aprendizagem.

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 sobre a efetividade do LVIPI como ferramenta de formação.

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 de um artefato voltado à modernização da formação em EdP. O principal resultado é a proposição de um modelo tecno-pedagógico integrado para o desenvolvimento de competências alinhadas à I5.0, que inclui a arquitetura do LVIPI e a especificação de uma série de arranjos físicos e virtuais para simulação de processos industriais.

4.1 Uma Base Teórica para a Formação do Engenheiro 5.0

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). Para os objetivos deste estudo, essa base foi reclassificada com base em Critérios de Inclusão (CI) estabelecidos para orientar a construção de uma base de conhecimento robusta para a formação do engenheiro:

- 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;

c) (CI03) Estudos sobre os princípios da I5.0 e sua transposição para a educação e formação profissional.

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. Essa distribuição evidencia que: a predominância do CI01 (*Design* e Desenvolvimento), com 97 referências (58,1%), demonstra o foco na criação de artefatos inovadores; o CI03 (Revisão e Contextualização), com 71 referências (42,5%), fornece a base conceitual sobre a I5.0 e sua interface com a educação; e a significativa interdisciplinaridade (25,3% das referências em múltiplos critérios) corrobora a solidez da fundamentação. Esta análise está orientada a preencher uma lacuna crucial: a transposição de princípios pedagógicos avançados e dos valores da I5.0 para um ambiente de aprendizagem aplicado, preparando o estudante para lidar com sistemas sociotécnicos complexos.

4.2 Proposição de Arranjos para Aprendizagem Experiencial na I5.0

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 e proporcionando uma jornada formativa progressiva. Para fins de exemplificação, será detalhado o primeiro destes arranjos:

a) Arranjo Físico Simples (AFS): Projetado para introduzir conceitos básicos de *layout* e fluxo. Este arranjo propositalmente simplificado visa construir confiança e compreensão de relações de causa e efeito fundamentais em um ambiente de risco zero, operacionalizando o princípio de *scaffolding* das MAE;

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, desenvolvendo a competência de otimização de processos;

c) Arranjo Físico Linear/Sequencial (AFL-S): Fluxo de Produção em *Design Thinking*: 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), simulando os *trade-offs* da indústria real. (Ver Anexo A - Modelo de Arranjo Físico).

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, construindo um caminho pedagógico para a formação das competências desejadas.

4.3 Discussão: O LVIPI como Vetor de Modernização da Formação

A discussão da proposta do LVIPI considera um desafio central: a dificuldade de transpor princípios pedagógicos avançados para ambientes virtuais de forma a promover uma aprendizagem significativa que vá 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 forçar a reflexão e a tomada de decisão em contextos de *trade-offs* complexos, formando um engenheiro com visão sistêmica.

4.3.1 Viabilidade e Potencial de Impacto na Formação

A análise de iniciativas análogas de sucesso, como o RExLab/UFSC e o Projeto Smart Metropolis/IMD-UFRN, oferece evidências contextuais da viabilidade e do potencial de impacto de artefatos como o LVIPI. Estes casos corroboram a viabilidade operacional e educacional da proposta, indicando que os desafios de implementação são superáveis. Nesse sentido, demonstram que ambientes virtuais bem estruturados podem ser integrados de forma eficaz ao ecossistema educacional, superando barreiras de acesso e oferecendo atividades práticas em larga escala que se alinham às demandas da indústria. Foram realizadas breves análises sobre os casos considerados emblemáticos:

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 Síntese da Proposição

A discussão centra-se no potencial do LVIPI para impactar positivamente a formação. A análise sistemática da literatura não apenas justificou a necessidade do artefato, mas forneceu os parâmetros para o desenho dos seus componentes centrais. Estes arranjos materializam a transição da teoria para a prática simulada, permitindo que os estudantes vivenciem, em um ambiente de risco zero, os complexos *trade-offs* da indústria real. A contribuição deste trabalho reside em preencher uma lacuna de projeto ao oferecer um modelo aplicável para a criação de experiências de aprendizagem que preparam o engenheiro para os desafios da I5.0.

O LVIPI e seus arranjos 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.

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 a formação em Engenharia de Produção frente aos desafios da Indústria 5.0.

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 Linear/Sequencial (AFL/S), conforme apresentado na Figura A1 do Anexo A -, operacionalizando a simulação de *trade-offs* entre eficiência, sustentabilidade e fator humano. Este conjunto fornece um modelo replicável para o desenvolvimento de competências sociotécnicas necessárias ao engenheiro no novo paradigma industrial.

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 a adoção e integração curricular do artefato, investigando seu impacto de longo prazo na formação profissional.

Conclui-se que o LVIPI representa uma contribuição alinhada com a necessidade urgente de formar engenheiros capazes de atuar em sistemas sociotécnicos complexos, promovendo uma transição para indústrias mais sustentáveis e centradas no ser humano. O artefato se posiciona não como um fim, mas como um meio inovador para capacitar a próxima geração de profissionais a liderar essa transformação.

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: 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>.

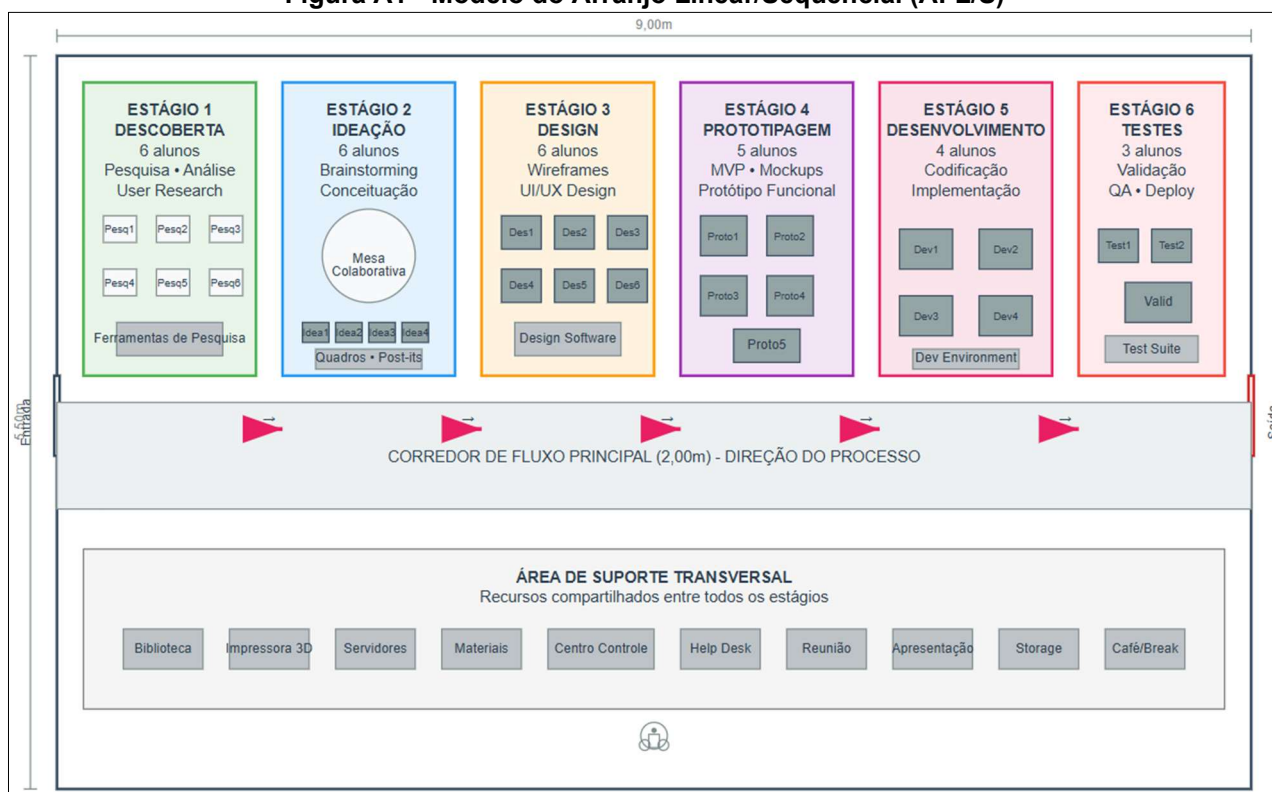
ZHANG, L.; BASHAM, J. D.; YANG, S. Understanding the implementation of personalized learning: A research synthesis. **Educational Research Review**, v. 31, p. 100339, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2020.100339>.

ANEXO

Anexo A - Modelo de Arranjo Físico

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

Figura A1 - Modelo do Arranjo Linear/Sequencial (AFL/S)



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)