

TRANSFORMAÇÃO DIGITAL 4.0 NO CONTEXTO AMAZÔNICO: TECNOLOGIAS HABILITADORAS ENVOLVIDAS NO PROGRAMA PRIORITÁRIO EM INDÚSTRIA 4.0

DIGITAL TRANSFORMATION 4.0 IN THE AMAZON CONTEXT: ENABLING TECHNOLOGIES INVOLVED IN THE PRIORITY PROGRAM IN INDUSTRY 4.0

Kassyane Nunes da Silva¹; Isabela Dambiski Gomes de Carvalho²; Bruno de Oliveira Maciel³; Orlando Renato Brenner Lantmann⁴; Hélio Gomes de Carvalho⁵; Gustavo Dambiski Gomes de Carvalho⁶

RESUMO: No contexto da Transformação Digital e Indústria 4.0 na Amazônia, especialmente Amazônia Ocidental e o Parque Industrial de Manaus (PIM), este artigo objetiva analisar as tecnologias habilitadoras envolvidas nos projetos do Programa Prioritário Indústria 4.0 e Modernização Industrial (PPI4.0). Adicionalmente, as principais áreas de aplicação também são identificadas. O trabalho apresenta na fundamentação teórica as definições de Indústria 4.0 e as principais tecnologias habilitadoras 4.0. A metodologia emprega a análise de dados secundários públicos, coletados em março de 2024, por meio de planilhas eletrônicas e ferramentas de Business Intelligence. Foram analisados 143 projetos, identificando as tecnologias habilitadoras mais recorrentes, como Computação em Nuvem, Análise de Dados Avançados, Inteligência Artificial e Internet das Coisas. Outras tecnologias 4.0 apresentaram menor destaque, como Interface das Coisas (Realidade Virtual, Aumentada e Mista), Cibersegurança, Impressão 3D, Blockchain, entre outras. As áreas de aplicação predominantes foram Informática, Educação, Eletroeletrônico e Telecomunicações, refletindo o perfil industrial da região.

Palavras-chave: Indústria 4.0, Transformação Digital, Tecnologias Habilitadoras, Programa Prioritário, Amazônia, Zona Franca de Manaus.

ABSTRACT: In the context of Digital Transformation and Industry 4.0 in the Amazon, especially Western Amazon and the Manaus Industrial Park (PIM), this article aims to analyze the enabling technologies involved in the projects of the Industry 4.0 and Industrial Modernization Priority Program (PPI4.0). Additionally, the main application areas are also identified. The work presents in the theoretical basis the definitions of Industry 4.0 and the main 4.0 enabling technologies. The methodology employs the analysis of public secondary data, collected in March 2024, through spreadsheets and Business Intelligence tools. 143 projects were analyzed, identifying the most recurring enabling technologies, such as Cloud Computing, Advanced Data Analysis, Artificial Intelligence, and the Internet of Things. Other 4.0 technologies were less prominent,

¹ Centro Internacional de Tecnologia de Software (CITS) / email: kassyane.silva@cits.br

² Centro Internacional de Tecnologia de Software (CITS.AM) / email: isabela.carvalho@cits.br

³ Centro Internacional de Tecnologia de Software (CITS.AM) / email: bruno.maciel@cits.br

⁴ Centro Internacional de Tecnologia de Software (CITS) / email: orlando.lantmann@cits.br

⁵ Centro Internacional de Tecnologia de Software (CITS.AM) / email: helio@utfpr.edu.br

⁶ Centro Internacional de Tecnologia de Software (CITS.AM) / email: gustavo.dambiski@gmail.com

Realização:

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção – UFAM
24 e 25 de Outubro de 2024, 1ª edição

such as Interface of Things (Virtual, Augmented and Mixed Reality), Cybersecurity, 3D Printing, Blockchain, among others. The predominant application areas were IT, Education, Electronics, and Telecommunications, reflecting the industrial profile of the region.

Keywords: Industry 4.0, Digital Transformation, Enabling Technologies, Priority Program, Amazon, Manaus Free Trade Zone.

1. INTRODUÇÃO

A transformação digital e a Indústria 4.0 têm se tornado temas de crescente relevância, atraindo a atenção tanto da comunidade acadêmica quanto do setor empresarial, devido ao potencial de revolucionar o panorama organizacional, especialmente no âmbito industrial. A origem do conceito remonta a 2011, fruto de uma estratégia governamental alemã voltada para o fortalecimento econômico futuro do país, com ênfase no setor industrial e na adoção de tecnologias habilitadoras inovadoras.

A Indústria 4.0 também é conhecida como a quarta revolução industrial, sucedendo as três anteriores. A primeira revolução industrial foi marcada pela mecanização e pelo uso de máquinas a vapor. A segunda revolução industrial destacou-se pelo advento da eletricidade e pela produção em massa por meio de linhas de montagem. A terceira revolução industrial trouxe a automação e a informatização dos processos produtivos.

Por sua vez, a quarta revolução industrial é caracterizada por tecnologias inovadoras principalmente relacionadas à digitalização e integração de sistemas e dados. As tecnologias habilitadoras 4.0 têm o potencial de contribuir para a otimização de recursos, o aumento da produtividade e a redução de custos de diferentes processos, especialmente industriais. As tecnologias 4.0 incluem Sistemas Ciberfísicos (CPS), Internet das Coisas (IoT), Internet dos Serviços (IoS), Big Data, Manufatura em Nuvem, Robótica, Simulação, Manufatura Aditiva, Realidade aumentada, Sistemas Integrados, entre outras (CNI, 2020; Resende, Rodrigues, Carvalho, and Pontes).

Nesse contexto de transformação tecnológica também está inserido o Polo Industrial de Manaus (PIM), integrante da Zona Franca de Manaus, cujos benefícios se estendem para a Amazônia Ocidental, incluindo os estados do Amazonas, Acre, Rondônia e Roraima, bem como as cidades de Macapá e Santana no Amapá (Suframa, 2017). O PIM é caracterizado por mais de 500 empresas industriais de diferentes segmentos como eletroeletrônico, duas rodas, termoplástico, entre outros, pela geração de cerca de quinhentos mil empregos diretos e indiretos e pelo faturamento anual acima de 120 bilhões de reais (Campos, 2024; Suframa, 2017).

Adicionalmente, o Comitê das Atividades de Pesquisa e Desenvolvimento na Amazônia (CAPDA) estabeleceu Programas Prioritários para o desenvolvimento da ciência, tecnologia e inovação da região. Os programas prioritários ativos em 2024 são: Bioeconomia; Fomento ao Empreendedorismo Inovador; e Indústria 4.0 e Modernização Industrial (PPI4.0), que possui como finalidade “por finalidade o desenvolvimento e a difusão tecnológica, o estímulo ao

Realização:

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção – UFAM
24 e 25 de Outubro de 2024, 1ª edição

progresso profissional e da cadeia produtiva, com a criação de novos negócios e a evolução das competências para a Transformação Digital e Indústria 4.0” (Suframa, 2023).

É nesse contexto que está inserido este trabalho, que tem como objetivo analisar as tecnologias habilitadoras envolvidas nos projetos do Programa Prioritário Indústria 4.0 e Modernização Industrial (PPI4.0). Adicionalmente, as principais áreas de aplicação também são identificadas. Para isso, este trabalho realiza análises descritivas a partir dos dados secundários públicos sobre os projetos executados/em execução do PPI4.0.

O restante do artigo está estruturado como explicado a seguir. Além da seção 1 de introdução, a seção 2 apresenta a fundamentação teórica sobre Indústria 4.0 e as tecnologias habilitadoras. A seção 3 apresenta a metodologia do trabalho. A seção 4 apresenta os principais resultados obtidos e a seção 5 conclui e inclui sugestões de trabalhos futuros.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Definições de Indústria 4.0 e Transformação Digital

Apesar da caracterização geral da Indústria 4.0 como a quarta revolução industrial, ainda não há uma definição única. Adicionalmente, a Transformação Digital também é um termo que se relaciona à Indústria 4.0. Assim, é válido destacar algumas definições encontradas na literatura e na prática pelas organizações.

A Indústria 4.0 refere-se aos recentes avanços tecnológicos, nos quais a Internet e tecnologias de suporte, como sistemas embarcados, atuam como base para integrar objetos físicos, pessoas, máquinas inteligentes, linhas de produção e processos. Essa integração atravessa fronteiras organizacionais para criar um novo ambiente inteligente, conectado e uma cadeia de valor ágil (Schumacher, Erol, & Sihm, 2016).

Resende, Rodrigues, Carvalho, and Pontes (2024, p. 457) afirmam que “A indústria 4.0 pode ser definida como uma recente revolução industrial que surge globalmente e traz consigo uma nova geração de indústrias.”

A Confederação Nacional da Indústria descreve que a Indústria 4.0 tem como uma das principais características a incorporação da digitalização à atividade da organização, integrando componentes físicos e virtuais. É a integração de diferentes tecnologias habilitadoras na gestão e na produção, principalmente a industrial, que configura essa revolução (CNI, 2020).

Já a Suframa (2018, local. 1), na resolução CAS-SUFRAMA nº 40, de 10.05.2018, traz em sua definição que a Indústria 4.0 “Representa a 4ª revolução Industrial, se caracterizando por um conjunto de tecnologias que permitem a fusão do mundo físico, digital e biológico nos processos produtivos, etapas da cadeia de valor, distribuição, etc;”.

A VDI (Verein Deutscher Ingenieure - Associação dos Engenheiros Alemães) define Indústria 4.0 como “Redes em tempo real, inteligentes, horizontais e verticais de pessoas, máquinas, objetos e sistemas TIC para o gerenciamento dinâmico de sistemas complexos” (VDI, 2020, p. 3, tradução livre). A mesma organização define Transformação Digital como o “Processo

Realização:

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção – UFAM
24 e 25 de Outubro de 2024, 1ª edição

contínuo de mudança baseado nas tecnologias digitais e seus efeitos, que no setor industrial visa especificamente a implementação da Indústria 4.0” (VDI, 2020, p. 3, tradução livre).

Por sua vez, o Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas (Carvalho, 2020; SEBRAE, 2016, p. 5) definiu Transformação Digital como:

“Processo de mudança cultural nos modelos de negócios pela integração de tecnologias digitais de forma pervasiva em todos os processos resultando em mudanças fundamentais na forma como é entregue valor para os clientes e para as partes interessadas”.

Por fim, o Centro Internacional de Tecnologia de Software – CITS, coordenador do PPI4.0, define que Transformação Digital (CITS, 2023, local. 1):

“É o processo contínuo das organizações (de comércio, indústria ou serviços) para integrar tecnologias habilitadoras em todas as áreas, por meio de mudanças fundamentais em estratégia, liderança, estrutura, pessoas, processos, cultura e negócios digitais, com o objetivo de suportar as tomadas de decisões a partir de dados, reduzir desperdícios e agregar valor aos seus clientes e à sociedade.”

Assim, é possível observar pelas definições que o termo Indústria 4.0 não se limita apenas ao setor industrial, isto é, de manufatura, mas foca especialmente nesse. Adicionalmente, o termo Transformação Digital é utilizado de forma ampla e tem uma componente do olhar da organização para essa transformação. Um destaque são as definições da VDI (2020), onde Indústria 4.0 foca nas tecnologias habilitadoras 4.0, enquanto Transformação Digital foca no processo de mudança organizacional.

2.2. Tecnologias habilitadoras 4.0

Existem várias tecnologias habilitadoras que caracterizam a Indústria 4.0. Assim como as definições de Indústria 4.0, ainda não há uma convergência completa sobre um número específico de tecnologias consideradas como 4.0. Contudo, as principais tecnologias habilitadoras 4.0 tendem a se repetir nas diferentes publicações.

Por exemplo, Resende, Rodrigues, Carvalho, and Pontes (2024) incluem sistemas ciberfísicos (CPS), Internet das Coisas (IoT), Internet dos Serviços (IoS), Big Data, Manufatura em Nuvem, Robótica, Simulação, Manufatura Aditiva, Realidade aumentada, Sistemas Integrados, entre outras. Já a CNI (2020) lista como tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0: Internet das Coisas, Big Data, Computação em Nuvem, Segurança Digital, Robótica Avançada, Manufatura Digital, Manufatura Aditiva, Integração de Sistemas, Inteligência Artificial, Sistemas de Simulação e Digitalização. Por sua vez, o CITS (2024) lista como tecnologias habilitadoras 4.0: Impressão 3D; Análise de Dados Avançados; Materiais Avançados; Robótica Avançada e Automação Cognitiva; Inteligência Artificial; Biotecnologia/Biomanufatura; Blockchain; Cibersegurança; Design Digital, Simulação e Integração; Armazenamento de Energia;

Realização:

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção – UFAM
24 e 25 de Outubro de 2024, 1ª edição

Computação de Alta Performance e Cognitiva; Interface das Coisas (Realidade Aumentada, Virtual e Mista); Internet das Coisas (IoT). Essas tecnologias 4.0 são detalhadas nas próximas seções.

2.2.1. Impressão 3D (Manufatura Aditiva)

A Manufatura Aditiva, também conhecida como impressão 3D, é uma tecnologia habilitadora fundamental da Indústria 4.0 que revoluciona os processos de fabricação tradicionais. Diferentemente dos métodos subtrativos convencionais, a manufatura aditiva constrói objetos tridimensionais adicionando material camada por camada, baseando-se em modelos digitais 3D (Ngo, Kashani, Imbalzano, Nguyen, & Hui, 2018). Esta tecnologia oferece vantagens significativas, como a capacidade de produzir geometrias complexas, personalização em massa, redução de desperdício de material e tempos de prototipação mais curtos (Ford & Despeisse, 2016).

2.2.2. Análise Avançada de Dados

A Análise Avançada de Dados emerge como uma tecnologia habilitadora crucial na Indústria 4.0, transformando drasticamente a tomada de decisões e a otimização de processos industriais. Esta abordagem vai além da análise descritiva tradicional, incorporando técnicas preditivas e prescritivas para extrair insights valiosos de grandes volumes de dados gerados por sensores, máquinas e sistemas interconectados (Lee, Kao, & Yang, 2014). Utilizando algoritmos de aprendizado de máquina e inteligência artificial, a análise avançada permite prever falhas de equipamentos, otimizar a manutenção preditiva, melhorar a qualidade do produto e aumentar a eficiência operacional (Wuest, Weimer, Irgens, & Thoben, 2016). No contexto da fabricação inteligente, essa tecnologia facilita a criação de "gêmeos digitais", representações virtuais de processos físicos que podem ser simulados e otimizados em tempo real (Tao et al., 2018).

2.2.3. Materiais Avançados

Os Materiais Avançados desempenham um papel fundamental como tecnologia habilitadora na Indústria 4.0, impulsionando inovações significativas em diversos setores industriais. Estes materiais, que incluem nanomateriais, materiais inteligentes, compósitos avançados e biomateriais, oferecem propriedades únicas que superam as limitações dos materiais convencionais (Bogue, 2014). No contexto da fabricação inteligente, os materiais avançados permitem o desenvolvimento de produtos com maior desempenho, durabilidade e funcionalidades aprimoradas. Por exemplo, os materiais inteligentes, capazes de responder a estímulos externos, estão sendo integrados em sistemas de monitoramento e controle, melhorando a eficiência e a segurança dos processos industriais (Bekas, Tsirka, Baltzis, & Paipetis, 2016).

2.2.4. Robótica

A Robótica Avançada emerge como uma tecnologia habilitadora crucial na Indústria 4.0, revolucionando os processos de manufatura e logística. Diferentemente dos robôs industriais tradicionais, os robôs avançados são caracterizados por sua maior flexibilidade, autonomia e capacidade de interação segura com humanos (Djuric, Urbanic, & Rickli, 2016). Os robôs colaborativos, ou "cobots", representam um avanço significativo, trabalhando lado a lado com operadores humanos em espaços compartilhados, aumentando a produtividade e a ergonomia

Realização:

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção – UFAM
24 e 25 de Outubro de 2024, 1ª edição

(Vysocky & Novak, 2016). Além disso, a integração de robôs móveis autônomos (AMRs) está transformando a logística interna, otimizando o fluxo de materiais e reduzindo os tempos de ciclo (Bortolini, Ferrari, Gamberi, Pilati, & Faccio, 2017).

2.2.5. Inteligência artificial

A Inteligência Artificial (IA) se destaca como uma tecnologia habilitadora central na Indústria 4.0, transformando fundamentalmente os processos de fabricação, tomada de decisão e interação homem-máquina. A IA engloba uma ampla gama de técnicas, incluindo aprendizado de máquina, redes neurais profundas, sistemas baseados em regras e processamento de linguagem natural, que permitem que as máquinas simulem processos cognitivos humanos (Lee, Davari, Singh, & Pandhare, 2018; Maciel et al., 2024). No contexto industrial, a IA está sendo aplicada para otimizar a produção, prever falhas de equipamentos, melhorar o controle de qualidade e personalizar produtos em escala (Wang, Ma, Zhang, Gao, & Wu, 2018).

2.2.6. Biotecnologia/Biomanufatura

A Biotecnologia e a Biomanufatura emergem como tecnologias habilitadoras inovadoras na Indústria 4.0, integrando princípios biológicos com processos industriais avançados para criar soluções sustentáveis e eficientes. A biomanufatura, por sua vez, emprega sistemas vivos como células ou biomoléculas para produzir biomateriais, biofármacos e outros bioprodutos em escala industrial (Tripathi & Shrivastava, 2019). Por exemplo, a biologia sintética está sendo utilizada para projetar microrganismos capazes de produzir químicos complexos e materiais avançados de forma mais eficiente e sustentável do que os métodos tradicionais (Bueso, Lehouritis, & Tangney, 2018). Além disso, a biofabricação está revolucionando a produção de tecidos e órgãos artificiais, utilizando técnicas de impressão 3D e engenharia de tecidos (Groll et al., 2016).

2.2.7. Blockchain

Blockchain emerge como uma tecnologia habilitadora disruptiva na Indústria 4.0, oferecendo um novo paradigma para transações seguras, transparentes e descentralizadas em ambientes industriais. No contexto da manufatura inteligente, o blockchain está sendo aplicado para melhorar a rastreabilidade da cadeia de suprimentos, garantir a autenticidade de produtos, otimizar processos de pagamento e facilitar contratos inteligentes auto executáveis (Leng et al., 2020). Por exemplo, a tecnologia permite o rastreamento preciso e transparente de materiais e componentes desde a origem até o produto final, reduzindo fraudes e melhorando a gestão de qualidade (Hasan et al., 2020). Além disso, o blockchain está possibilitando novos modelos de negócios na indústria, como marketplaces descentralizados para capacidade de manufatura e plataformas de compartilhamento de dados seguras entre parceiros da cadeia de valor (Li, Barenji, & Huang, 2018).

2.2.8. Cibersegurança

A Cibersegurança emerge como uma tecnologia habilitadora crítica na Indústria 4.0, desempenhando um papel fundamental na proteção dos sistemas interconectados e dos dados sensíveis que caracterizam o ambiente de fabricação inteligente. Com a crescente digitalização e integração de sistemas físicos e virtuais, as indústrias se tornam mais vulneráveis a ameaças cibernéticas, tornando a segurança cibernética uma prioridade estratégica (Thames & Schaefer, 2017). As soluções de cibersegurança na Indústria 4.0 abrangem uma ampla gama de tecnologias e práticas, incluindo criptografia avançada, detecção e prevenção de intrusões,

Realização:

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção – UFAM
24 e 25 de Outubro de 2024, 1ª edição

gerenciamento de identidade e acesso, e análise de segurança baseada em inteligência artificial (Tuptuk & Hailes, 2018). Por exemplo, a implementação de arquiteturas de segurança em camadas e o uso de gêmeos digitais para simulação de ameaças estão se tornando práticas comuns para proteger infraestruturas críticas (Lezzi, Lazoi, & Corallo, 2018).

2.2.9. Design Digital, Simulação e Integração

A Simulação e Integração emergem como tecnologias habilitadoras cruciais na Indústria 4.0, permitindo a criação de ambientes virtuais que replicam com precisão sistemas físicos e processos de produção. Estas tecnologias facilitam a otimização de processos, a tomada de decisões baseada em dados e a previsão de cenários futuros com um nível de precisão sem precedentes (Uhlemann, Lehmann, & Steinhilper, 2017). No coração desta revolução está o conceito de "gêmeo digital", uma representação virtual dinâmica de um produto, processo ou sistema físico que integra dados em tempo real, aprendizado de máquina e simulação para permitir tomadas de decisão mais informadas (Tao et al., 2018). A combinação de simulação e integração com outras tecnologias da Indústria 4.0, como a Internet das Coisas e a Inteligência Artificial, está possibilitando a criação de "fábricas inteligentes" altamente adaptáveis e eficientes (Zhong, Xu, Klotz, & Newman, 2017). À medida que estas tecnologias continuam a evoluir, espera-se que desempenhem um papel cada vez mais central na otimização de processos industriais, na redução de custos e na aceleração da inovação no setor manufatureiro.

2.2.10. Armazenamento de Energia

Sistemas avançados de armazenamento, como baterias de íon-lítio de alta capacidade, células de combustível e tecnologias de armazenamento térmico, estão revolucionando a gestão energética industrial, proporcionando maior flexibilidade operacional e resiliência à rede elétrica (Luo, Wang, Dooner, & Clarke, 2015). Além disso, o desenvolvimento de smart grids integradas com sistemas de armazenamento distribuído está possibilitando uma melhor resposta à demanda e uma redução significativa nos custos operacionais (Beaudin, Zareipour, Schellenberglobe, & Rosehart, 2010). Esta sinergia entre armazenamento de energia e tecnologias digitais não apenas melhora a eficiência energética global, mas também facilita a transição para uma produção mais sustentável e alinhada com os princípios da quarta revolução industrial (Olabi et al., 2021).

2.2.11. Computação de Alta Performance & Cognitivo

A Computação de Alta Performance (HPC) e a Computação Cognitiva emergem como tecnologias habilitadoras cruciais na Indústria 4.0, fornecendo o poder de processamento necessário para lidar com os enormes volumes de dados e a complexidade dos sistemas de fabricação inteligentes. A HPC permite a execução de simulações complexas, análises de big data e modelagem em tempo real, essenciais para a otimização de processos e tomada de decisões baseada em dados (Agrawal & Vieira, 2013). Por outro lado, a Computação Cognitiva, que incorpora inteligência artificial e aprendizado de máquina, permite que os sistemas industriais "aprendam" com os dados, se adaptem a novas situações e até mesmo prevejam eventos futuros (Rüßmann et al., 2015). A integração da HPC e da Computação Cognitiva com outras tecnologias da Indústria 4.0, como a Internet das Coisas e a robótica avançada, está criando ecossistemas industriais altamente adaptativos e inteligentes (Zhong et al., 2017).

Realização:

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção – UFAM
24 e 25 de Outubro de 2024, 1ª edição

2.2.12. Interface das Coisas

A Realidade Aumentada (RA), Realidade Virtual (RV) e Realidade Mista (RM) emergem como tecnologias habilitadoras transformadoras na Indústria 4.0, revolucionando a interação homem-máquina e os processos de fabricação. A RA sobrepõe informações digitais ao mundo físico, a RV cria ambientes totalmente imersivos, e a RM combina elementos de ambas, permitindo interações entre objetos reais e virtuais (Damiani, Demartini, Guizzi, Revetria, & Tonelli, 2018). Por exemplo, a RA está sendo utilizada para fornecer instruções visuais em tempo real para operadores de linha de montagem, reduzindo erros e aumentando a eficiência (Masood & Egger, 2019). A RV, por sua vez, está possibilitando a criação de protótipos virtuais e simulações de fábrica, acelerando o processo de design e otimização de layouts (Berg & Vance, 2017).

2.2.13. Internet das Coisas

A Internet das Coisas (IoT) emerge como uma tecnologia habilitadora fundamental na Indústria 4.0, transformando radicalmente a maneira como os sistemas industriais operam e se comunicam. A IoT refere-se à interconexão de dispositivos físicos, veículos, eletrodomésticos e outros itens embarcados com eletrônica, software, sensores e conectividade de rede, permitindo que esses objetos coletem e troquem dados (Atzori, Iera, & Morabito, 2010). No contexto industrial, a IoT Industrial (IIoT) está criando fábricas inteligentes onde máquinas, produtos e sistemas estão interconectados, permitindo monitoramento em tempo real, manutenção preditiva e otimização automática de processos (Da Xu, He, & Li, 2014). Por exemplo, sensores IoT em equipamentos de produção podem coletar dados continuamente sobre desempenho e condições operacionais, alimentando sistemas de análise avançada para prever falhas antes que ocorram (Lee, Bagheri, & Kao, 2015).

3. METODOLOGIA

Com base nas classificações metodológicas de Gil (2012) em termos de (1) finalidade, (2) propósito, (3) natureza dos dados, (4) coleta dos dados e (5) controle das variáveis, esta pesquisa pode ser classificada como (1) aplicada, (2) descritiva, (3) quantitativa, (4) com uso de dados secundários; e (5) não experimental.

Este trabalho utilizou como fonte de dados secundários as descrições resumidas dos projetos executados/em execução do Programa Prioritário em Indústria 4.0, disponibilizados publicamente no site institucional da coordenação do programa (CITS, 2023). Os dados disponíveis estão organizados em uma tabela que inclui como colunas: número do projeto, título do projeto, instituição executar, valores, tipo de projeto, tema, atividade e resumo do projeto.

A coleta de dados ocorreu em março de 2024. Os dados públicos foram salvos e analisados por meio de planilha eletrônica (Excel) e aplicativo de Business Intelligence (Power BI). No total, foram analisados os títulos e os resumos de 143 projetos para identificar a utilização de tecnologias habilitadoras 4.0., bem como as grandes áreas de aplicação.

Foram utilizadas para identificação as tecnologias habilitadoras listadas pelo (CITS, 2023) no site sobre o Programa Prioritário em Indústria 4.0 (PPI 4.0), nomeadamente:

1. Impressão 3D;
2. Análise de Dados Avançados;
3. Materiais Avançados;
4. Robótica Avançada e Automação Cognitiva;
5. Inteligência Artificial;
6. Biotecnologia/Biomanufatura;

Realização:

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção – UFAM
24 e 25 de Outubro de 2024, 1º edição

7. BlockChain;
8. Cibersegurança;
9. Design Digital, Simulação e Integração;
10. Armazenamento de Energia;
11. Computação de Alta Performance e Cognitiva;
12. Interface das Coisas (Realidade Aumentada, Virtual e Mista);
13. Internet das Coisas (IoT).

Em relação às áreas de aplicação, também foram utilizadas aquelas listadas pelo (CITS, 2023) no site sobre o Programa Prioritário em Indústria 4.0 (PPI 4.0), a saber:

1. Informática;
2. Energia;
3. Saúde;
4. Agronegócio;
5. Eletroeletrônico;
6. Telecomunicações;
7. Educação;
8. Transporte.

Assim, a partir da análise de títulos e resumos dos projetos, foram identificadas as tecnologias presentes bem como as áreas de aplicação. Vale ressaltar que mais de uma tecnologia ou área poderia ser identificada por projeto. Do mesmo modo, projetos com poucas informações no título e no resumo poderiam resultar em nenhuma identificação de tecnologias ou áreas. De forma geral, a identificação foi organizada em uma planilha, onde a presença da tecnologia ou área de aplicação foi representada pelo número 1 (um) e a ausência foi representada pelo número 0 (zero). A partir de todas as identificações, os dados quantitativos foram analisados de forma descritiva por meio da soma das ocorrências e gráficos de barras.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A tabela 1 apresenta o número de ocorrências das tecnologias habilitadoras em projetos do PPI 4.0, ou seja, o número de projetos em que determinada tecnologia 4.0 esteve presente. Adicionalmente, foi adicionada a coluna ranking para facilitar a indicação das tecnologias com maior ocorrência nos projetos.

Tabela 1. Projetos com Tecnologias Habilitadoras 4.0

Tecnologia Habilitadora 4.0	Projetos	Ranking
Impressão 3D	4	11
Análise de Dados Avançados	69	2
Computação em Nuvem	74	1
Materiais Avançados	0	13
Robótica Avançada e Automoção Cognitiva	38	5
Inteligência Artificial	67	3
Biotecnologia Biomanufatura	0	13
Blockchain	2	12
Cibersegurança	6	9
Design Digital, Simulação e Integração	10	7

Realização:

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção – UFAM
24 e 25 de Outubro de 2024, 1ª edição

Armazenamento de Energia	6	9
Computação de Alta Performance & Cognitiva	7	8
Interface das Coisas (Realidade Virtual, Aumentada e Mista)	14	6
Internet das Coisas	62	4

Fonte: os autores (2024)

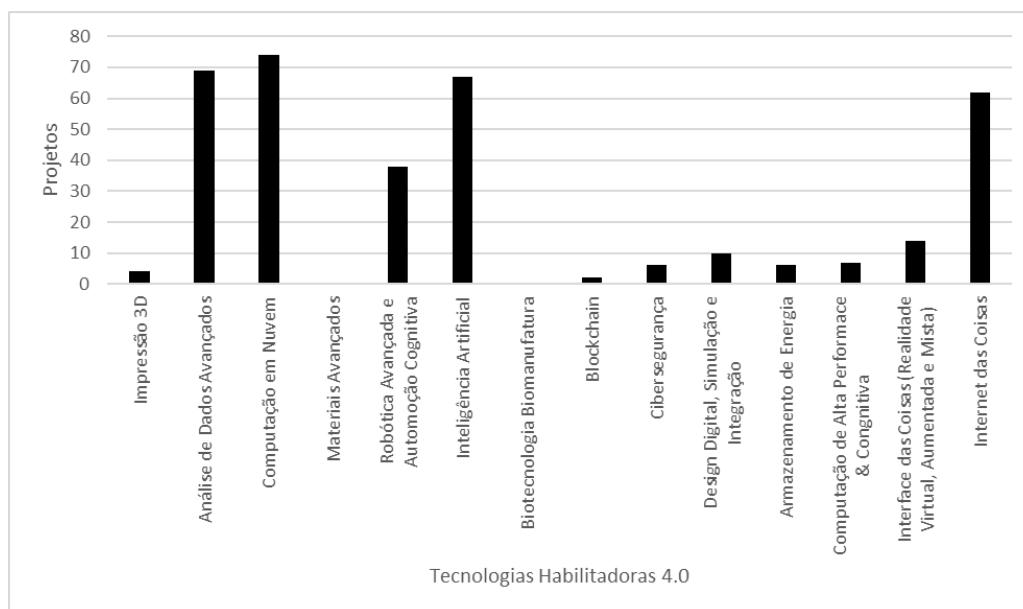


Gráfico 1. Número de Projetos com Tecnologias Habilitadoras 4.0

Fonte: os autores (2024)

O Gráfico 1 complementa a tabela 1 ao ilustrar a frequência de ocorrência de projetos com as tecnologias habilitadoras. A tecnologia habilitadora 4.0 "Computação em Nuvem" apresenta o maior valor, com 74 ocorrências; seguida por "Análise de Dados Avançados" com 69; "Inteligência Artificial" com 67; e "Internet das Coisas" com 62. Em quinto lugar isolado está "Robótica Avançada e Automação Cognitiva", que tem 38 ocorrências em projetos. As tecnologias com menor expressão incluíram "Interface das Coisas (Realidade Virtual, Aumentada e Mista)", com 14; "Design Digital" com 10; "Armazenamento de Energia" com 6; "Cibersegurança" com 6, "Impressão 3D" com 4; e "Blockchain" com 2 ocorrências. Áreas como "Materiais Avançados" e "Biotechnologia e Biomanufatura" não apresentaram ocorrências (0).

A tabela 2 apresenta o número de ocorrências das áreas de aplicação dos projetos do PPI 4.0, ou seja, o número de projetos aplicados em determinada área. O Gráfico 2 complementa a tabela 2 ao apresentar os dados de modo visual.

Tabela 2. Projetos por área de aplicação

Áreas de aplicação	Projetos	Ranking
Informática	33	1
Energia	5	5
Saúde	4	6
Agronegócio	0	8
Eletroeletrônico	16	3

Realização:

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção – UFAM
24 e 25 de Outubro de 2024, 1ª edição

Telecomunicação	13	4
Educação	22	2
Transporte	4	6

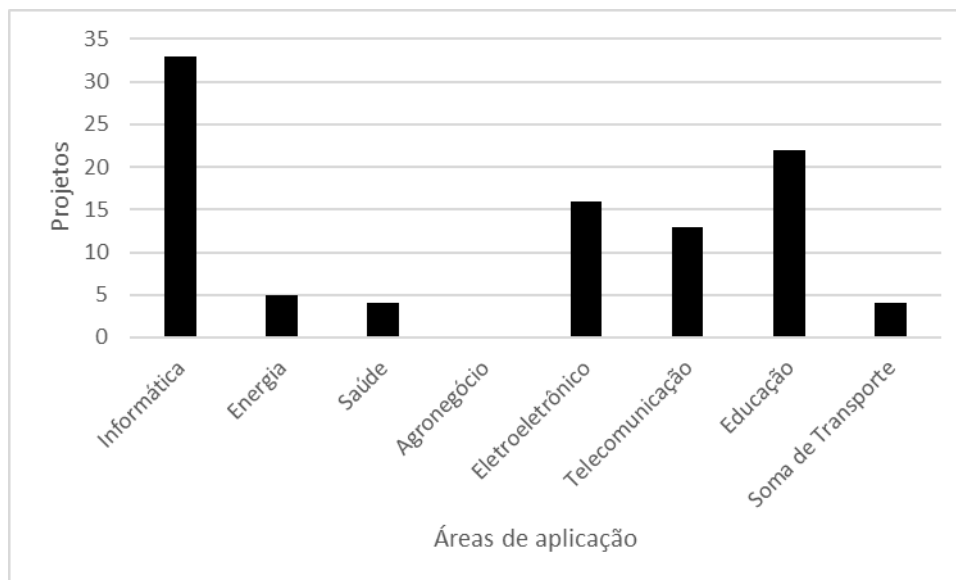


Gráfico 2. Número de projetos por área de aplicação
Fonte: os autores (2024)

Como é possível observar na Tabela 2 e no Gráfico 2, a área de "Informática" lidera com 33 ocorrências, seguida por "Educação" com 22. "Eletroeletrônica" aparece com 16, e "Telecomunicação" com 13. "Energia", "Transporte" e "Saúde" compartilham valores próximos, com 5, 4 e 4 ocorrências, respectivamente. "Agronegócio" não apresenta ocorrências (0). Outro destaque é que o número de ocorrências de áreas de aplicação é inferior ao número de projetos analisados. Isso ocorreu devido às informações de título e resumo de alguns projetos, em que não foi possível identificar com clareza a área de aplicação. Por fim, a predominância de "Informática" e "Educação" indicam o foco de aplicação dos projetos do Programa Prioritário em Indústria 4.0.

5. CONCLUSÃO

O objetivo deste artigo foi atingido, pois foram analisadas as tecnologias habilitadoras envolvidas nos projetos do Programa Prioritário Indústria 4.0 e Modernização Industrial (PPI4.0). Adicionalmente, as principais áreas de aplicação também foram identificadas.

Os resultados indicaram que as principais tecnologias habilitadoras 4.0 envolvidas incluem Computação em Nuvem, Análise de Dados Avançados, Inteligência Artificial e Internet das Coisas, seguidas moderadamente por Robótica Avançada e Automação Cognitiva. Outras tecnologias 4.0 tiveram menor proeminência como Interface das Coisas (Realidade Virtual, Aumentada e Mista), Cibersegurança, Impressão 3D, Blockchain, entre outras. Adicionalmente, as áreas de maior aplicação dos projetos do PPI 4.0 foram Informática e Educação, seguidos de Eletroeletrônica e Telecomunicação, o que está em concordância com as características

Realização:

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção – UFAM
24 e 25 de Outubro de 2024, 1ª edição

regionais do Polo Industrial de Manaus (PIM) e da região da Amazônia Ocidental abrangida pela Zona Franca e Suframa.

Como limitações deste trabalho, destaca-se que as informações foram coletadas a partir de dados secundários públicos, especialmente os títulos e resumos dos projetos executados. Nesse sentido, informações detalhadas dos projetos poderiam permitir identificações de mais tecnologias e aplicações. Por outro lado, esse tipo de informação detalhada de projeto seria difícil de obter uma vez que estão inseridas no contexto de projetos de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação, bem como de potencial propriedade intelectual. Assim, apesar da limitação de dados secundários, o método empregado e o resultado da pesquisa são adequados.

Por fim, como sugestões de pesquisas futuras, um caminho de pesquisa poderia ser o aprofundamento qualitativo da compreensão da aplicação das tecnologias habilitadoras 4.0 no âmbito da região do PIM e da Amazônia Ocidental, bem como análises da evolução da maturidade em Indústria 4.0 e Transformação Digital das empresas e seus respectivos processos, especialmente as indústrias.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio do Centro Internacional de Tecnologia de Software - CITS.

REFERÊNCIAS

- Agrawal, S., & Vieira, D. (2013). A survey on Internet of Things. *Abakós*, 1(2), 78-95.
- Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2010). The internet of things: A survey. *Computer networks*, 54(15), 2787-2805.
- Beaudin, M., Zareipour, H., Schellenberglobe, A., & Rosehart, W. (2010). Energy storage for mitigating the variability of renewable electricity sources: An updated review. *Energy for sustainable development*, 14(4), 302-314.
- Bekas, D., Tsirka, K., Baltzis, D., & Paipetis, A. S. (2016). Self-healing materials: A review of advances in materials, evaluation, characterization and monitoring techniques. *Composites Part B: Engineering*, 87, 92-119.
- Berg, L. P., & Vance, J. M. (2017). Industry use of virtual reality in product design and manufacturing: a survey. *Virtual reality*, 21, 1-17.
- Bogue, R. (2014). Smart materials: a review of capabilities and applications. *Assembly Automation*, 34(1), 16-22.
- Bortolini, M., Ferrari, E., Gamberi, M., Pilati, F., & Faccio, M. (2017). Assembly system design in the Industry 4.0 era: a general framework. *Ifac-Papersonline*, 50(1), 5700-5705.
- Bueso, Y. F., Lehouritis, P., & Tangney, M. (2018). In situ biomolecule production by bacteria; a synthetic biology approach to medicine. *Journal of Controlled Release*, 275, 217-228.
- CITS. (2023). PPI 4.0: Acelerando a transformação digital no ecossistema da Amazônia Ocidental. Retrieved from <https://ppi40.cits.br/>
- CNI. (2020). *A difusão das tecnologias da indústria 4.0 em empresas brasileiras*. Brasília: CNI.
- Da Xu, L., He, W., & Li, S. (2014). Internet of things in industries: A survey. *IEEE Transactions on industrial informatics*, 10(4), 2233-2243.

Realização:

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção – UFAM
24 e 25 de Outubro de 2024, 1ª edição

- Damiani, L., Demartini, M., Guizzi, G., Revetria, R., & Tonelli, F. (2018). Augmented and virtual reality applications in industrial systems: A qualitative review towards the industry 4.0 era. *Ifac-Papersonline*, 51(11), 624-630.
- Djuric, A. M., Urbanic, R., & Rickli, J. (2016). A framework for collaborative robot (CoBot) integration in advanced manufacturing systems. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, 9(2), 457-464.
- Ford, S., & Despeisse, M. (2016). Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. *Journal of Cleaner Production*, 137, 1573-1587.
- Gil, A. C. (2012). *Métodos e Técnicas de Pesquisa Social* (6 ed.). São Paulo: Atlas.
- Groll, J., Boland, T., Blunk, T., Burdick, J. A., Cho, D.-W., Dalton, P. D., . . . Mironov, V. A. (2016). Biofabrication: reappraising the definition of an evolving field. *Biofabrication*, 8(1), 013001.
- Hasan, H. R., Salah, K., Jayaraman, R., Omar, M., Yaqoob, I., Pesic, S., . . . Boscovic, D. (2020). A blockchain-based approach for the creation of digital twins. *IEEE Access*, 8, 34113-34126.
- Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H.-A. (2015). A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing letters*, 3, 18-23.
- Lee, J., Davari, H., Singh, J., & Pandhare, V. (2018). Industrial Artificial Intelligence for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing letters*, 18, 20-23.
- Lee, J., Kao, H.-A., & Yang, S. (2014). Service innovation and smart analytics for industry 4.0 and big data environment. *Procedia Cirp*, 16, 3-8.
- Leng, J., Ye, S., Zhou, M., Zhao, J. L., Liu, Q., Guo, W., . . . Fu, L. (2020). Blockchain-secured smart manufacturing in industry 4.0: A survey. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 51(1), 237-252.
- Lezzi, M., Lazoi, M., & Corallo, A. (2018). Cybersecurity for Industry 4.0 in the current literature: A reference framework. *Computers in Industry*, 103, 97-110.
- Li, Z., Barenji, A. V., & Huang, G. Q. (2018). Toward a blockchain cloud manufacturing system as a peer to peer distributed network platform. *Robotics and computer-integrated manufacturing*, 54, 133-144.
- Luo, X., Wang, J., Dooner, M., & Clarke, J. (2015). Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. *Applied energy*, 137, 511-536.
- Maciel, B. d. O., Carvalho, I. D. G., Fatima Mendes, L., Silva, K. N., Lantmann, O. R. B., Carvalho, H. G., & Carvalho, G. D. G. (2024). FERRAMENTAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL. *Encontro Internacional de Gestão, Desenvolvimento e Inovação (EIGEDIN)*, 7(1).
- Masood, T., & Egger, J. (2019). Augmented reality in support of Industry 4.0—Implementation challenges and success factors. *Robotics and computer-integrated manufacturing*, 58, 181-195.
- Olabi, A. G., Onumaegbu, C., Wilberforce, T., Ramadan, M., Abdelkareem, M. A., & Al-Alami, A. H. (2021). Critical review of energy storage systems. *Energy*, 214, 118987.
- Resende, L. M., Rodrigues, T. V., Carvalho, G. D. G., & Pontes, J. (2024). A comprehensive model for assessing Industry 4.0 readiness in diverse enterprises. *Int. J. Agile Systems and Management*, 17(4), 455-482.
- Rüßmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus, J., Engel, P., & Harnisch, M. (2015). Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries. *Boston consulting group*, 9(1), 54-89.

Realização:

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção – UFAM
24 e 25 de Outubro de 2024, 1º edição

- Suframa. (2017). Abrangência. Retrieved from <https://www.gov.br/suframa/pt-br/assuntos/abrangencia>
- Suframa. (2023). Programas Prioritários. Retrieved from <https://www.gov.br/suframa/pt-br/zfm/pdi/modalidades/pps>
- Tao, F., Cheng, J., Qi, Q., Zhang, M., Zhang, H., & Sui, F. (2018). Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94, 3563-3576.
- Thames, L., & Schaefer, D. (2017). *Cybersecurity for industry 4.0*: Springer.
- Tripathi, N. K., & Shrivastava, A. (2019). Recent developments in bioprocessing of recombinant proteins: expression hosts and process development. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 7, 420.
- Tuptuk, N., & Hailes, S. (2018). Security of smart manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems*, 47, 93-106.
- Uhlemann, T. H.-J., Lehmann, C., & Steinhilper, R. (2017). The digital twin: Realizing the cyber-physical production system for industry 4.0. *Procedia Cirp*, 61, 335-340.
- Vysocky, A., & Novak, P. (2016). Human-robot collaboration in industry. *MM Science Journal*, 9(2), 903-906.
- Wang, J., Ma, Y., Zhang, L., Gao, R. X., & Wu, D. (2018). Deep learning for smart manufacturing: Methods and applications. *Journal of Manufacturing Systems*, 48, 144-156.
- Wuest, T., Weimer, D., Irgens, C., & Thoben, K.-D. (2016). Machine learning in manufacturing: advantages, challenges, and applications. *Production & Manufacturing Research*, 4(1), 23-45.
- Zhong, R. Y., Xu, X., Klotz, E., & Newman, S. T. (2017). Intelligent manufacturing in the context of industry 4.0: a review. *Engineering*, 3(5), 616-630.
- Carvalho, F. Z. d. (2020). Inovação intraorganizacional: um estudo de caso do Inova Sebrae.
- CITS. (2023). PPI 4.0: Acelerando a transformação digital no ecossistema da Amazônia Ocidental. Retrieved from <https://ppi40.cits.br/>
- CNI. (2020). *A difusão das tecnologias da indústria 4.0 em empresas brasileiras*. Brasília: CNI.
- Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T., & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 143, 172-196.
- Resende, L. M., Rodrigues, T. V., Carvalho, G. D. G., & Pontes, J. (2024). A comprehensive model for assessing Industry 4.0 readiness in diverse enterprises. *Int. J. Agile Systems and Management*, 17(4), 455-482.
- Schumacher, A., Erol, S., & Sihn, W. (2016, Sep 04-06). *A maturity model for assessing Industry 4.0 readiness and maturity of manufacturing enterprises*. Paper presented at the 6th International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV), Bath, ENGLAND.
- SEBRAE. (2016). *A transformação digital do Sistema Sebrae*. Brasília: SEBRAE.
- Suframa. (2018). Resolução CAS-SUFRAMA nº 40, de 10.05.2018.

Realização:

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção – UFAM
24 e 25 de Outubro de 2024, 1º edição

VDI. (2020). VDI 4000 Part 1 - Selection of Industry 4.0 maturity models for the digital transformation of manufacturing companies Basics. In.

Realização:

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção – UFAM
24 e 25 de Outubro de 2024, 1ª edição