



Heterogeneidade estrutural e difusão das tecnologias digitais na indústria de transformação brasileira

Wallace Marcelino Pereira*

Adilson Giovanini*

Pablo Felipe Bittencourt ♥

Resumo: Este artigo analisa a difusão setorial das tecnologias digitais na indústria de transformação brasileira, investigando em que medida a atual onda de digitalização contribui para reduzir ou reproduzir a heterogeneidade estrutural característica das economias em desenvolvimento. Ancorado na abordagem neoschumpeteriana, o estudo combina evidências descritivas da Pesquisa de Inovação (PINTEC) com testes estatísticos de heterogeneidade e modelos econométricos estimados em nível setorial, por divisão CNAE 2.0, para 2024. A análise distingue tecnologias digitais de uso mais geral, como computação em nuvem, daquelas associadas à automação produtiva e à integração ciberfísica, como análise de big data, robótica e manufatura aditiva. Os resultados indicam que, embora a digitalização esteja amplamente difundida na indústria brasileira, sua intensidade e natureza variam significativamente entre os setores. Tecnologias digitais mais complexas apresentam maior concentração em setores de média-alta e alta intensidade tecnológica, enquanto tecnologias transversais tendem a se difundir de forma mais homogênea. As evidências sugerem que a digitalização, por si só, não promove transformação estrutural automática, tendendo a reproduzir padrões históricos de heterogeneidade produtiva. Do ponto de vista das políticas de desenvolvimento produtivo, os resultados indicam a necessidade de estratégias que articulem a difusão de tecnologias digitais com o fortalecimento das capacidades produtivas, organizacionais e tecnológicas das firmas.

Palavras-chave: digitalização; heterogeneidade estrutural; indústria de transformação; mudança tecnológica; política industrial

Código JEL: O1; O3; Q55

Área Temática: 1.6 Novos temas - Indústria 4.0, Internet das coisas, outros

* Professor Adjunto do Programa de Pós-Graduação em Economia da Universidade Federal do Pará (UFPA), Belém/PA, Brasil. LAPED (www.olaped.com.br) - E-mail: wmpereirabr@ufpa.br

* Professor adjunto da Universidade do Estado de Santa Catarina, Balneário Cambiú, Brasil. LAPED (www.olaped.com.br) - E-mail: adilson.giovanini@udesc.br

♥ Professor Associado do Departamento de Economia da Universidade Feral de Santa Catarina, e do edo Mestrado Profissional em Propriedade Intelectual e Transferência de Tecnologia para Inovação. E-mail: pablofelipe.bittencourt@gmail.com

Structural heterogeneity and diffusion of digital technologies in the Brazilian manufacturing industry.

Abstract: This paper analyzes the sectoral diffusion of digital technologies in the Brazilian manufacturing industry, examining whether the current wave of digitalization contributes to reducing or reproducing the structural heterogeneity typical of developing economies. Grounded in neo-Schumpeterian approach, the study combines descriptive evidence from the Innovation Survey (PINTEC) with statistical tests of heterogeneity and the sectoral level, by CNAE 2.0 division, for 2024. The analysis distinguishes general-purpose digital technologies, such as cloud computing, from those associated with production automation and cyber-physical integration, including big data analytics, robotics, and additive manufacturing. The results show that, although digitalization is widely diffused across Brazilian manufacturing, its intensity and qualitative profile vary significantly across sectors. More complex digital technologies are disproportionately concentrated in medium-high and high-technology sectors, while transversal technologies tend to spread more homogeneously. These findings suggest that digitalization alone does not automatically foster structural transformation but rather tends to reproduce pre-existing patterns of productive heterogeneity. From a productive development policy perspective, the results highlight the need for strategies that combine the diffusion of digital technologies with the strengthening of firms' productive, organizational, and technological capabilities.

Keywords: digitalization; structural heterogeneity; manufacturing industry; technological change; industrial policy.

1. Introdução

Extensa literatura mostra o papel essencial da mudança estrutural para o desenvolvimento econômico (Lewis, 1954; Prebisch 1949; Furtado 1964; Kaldor, 1966; McMillan e Rodrik, 2011). A transferência de mão-de-obra (e de capital) do setor tradicional para o setor moderno torna possível aumentar a produtividade do trabalho e a taxa de crescimento do produto. O setor moderno, identificado como o setor industrial, opera com retornos crescentes de escala e tem sido o *locus* da inovação tecnológica ao congregar variadas formas de integração produtiva associadas as ferramentas digitais provenientes do setor de serviços modernos.

A difusão recente de tecnologias digitais associadas à chamada Indústria 4.0 tem reavivado o debate sobre seus potenciais impactos estruturais sobre a organização produtiva, a dinâmica da inovação e as trajetórias de desenvolvimento econômico, especialmente em economias em desenvolvimento (Freeman; Perez, 1988; Perez, 2002). Tecnologias como computação em nuvem, Internet das Coisas (IoT), análise de *big data*, Inteligência Artificial (IA), robótica avançada e manufatura aditiva (MA) vêm sendo frequentemente apresentadas como elementos centrais de uma nova revolução tecnológica, capaz de redefinir padrões de competitividade industrial e abrir novas janelas de oportunidade para o *catching up* tecnológico. No entanto, a literatura neoschumpeteriana alerta que a difusão dessas tecnologias tende a ocorrer de forma estruturalmente heterogênea entre setores e países, sendo condicionada pelas capacidades tecnológicas, organizacionais e institucionais previamente acumuladas, o que pode resultar na reprodução, ou mesmo no aprofundamento de assimetrias produtivas preexistentes (Bell; Pavitt, 1993; Bell, 2009).

No caso brasileiro, esse debate assume particular relevância diante da heterogeneidade estrutural da indústria, e do histórico de desindustrialização em curso, cujos efeitos sobre o crescimento econômico não são desprezíveis. A incorporação seletiva do progresso técnico ao longo do processo de industrialização resultou na coexistência de setores com níveis muito distintos de produtividade, intensidade tecnológica e capacidade inovativa, o que coloca em questão a extensão e a profundidade com que as novas tecnologias digitais podem se difundir pela estrutura produtiva (Stradioto; Frazzon, 2023; Reis, 2021). À luz dessas abordagens, a questão central que orienta este estudo é: em que medida a adoção de diferentes tecnologias digitais na indústria de transformação brasileira apresenta heterogeneidade setorial, associada a intensidade tecnológica dos setores?

Com base nesse questionamento, o objetivo do artigo é analisar empiricamente os determinantes setoriais da adoção de tecnologias digitais na indústria de transformação brasileira, com ênfase no papel da intensidade tecnológica, a partir de informações da Pesquisa de Inovação (PINTEC). Ao adotar a perspectiva setorial, o estudo busca contribuir para a literatura de três formas, a saber: 1) promover uma estrutura analítica baseada em classificação setorial por intensidade tecnológica de ampla aceitação nacional e internacional; 2) captar o padrão de incorporação de tecnologias digitais tendo como referência a composição estrutural da economia brasileira, e; 3) construir uma análise que congregue o tema da mudança estrutural com a teoria neoschumpeteriana acerca da difusão tecnologicamente desigual das inovações ao longo da estrutura produtiva.

A investigação empírica é guiada por duas hipóteses principais. A primeira hipótese sustenta que a adoção de tecnologias digitais na indústria brasileira é estruturalmente heterogênea entre setores, sendo significativamente mais elevada em setores de média-alta e alta intensidade tecnológica, sobretudo no caso de tecnologias digitais mais complexas e intensivas em capital físico e capacidades organizacionais, como robótica, MA e análise de *big data*. A segunda hipótese propõe que tecnologias digitais de uso mais geral e baseadas predominantemente em software, como a computação em nuvem, apresentam padrões de difusão mais homogêneos entre os setores industriais, refletindo menores barreiras à adoção e menor dependência de capacidades tecnológicas previamente acumuladas.

Ao testar essas hipóteses, o artigo pretende preencher uma lacuna relacionada ao debate sobre os limites e as possibilidades da atual onda de digitalização como vetor de transformação estrutural da indústria brasileira, oferecendo evidências empíricas que ajudam a qualificar a discussão sobre o papel das tecnologias digitais no desenvolvimento industrial e tecnológico do país.

Além dessa introdução, o artigo tem mais quatro seções. A Seção 2, a seguir, realiza uma revisão

da literatura de transformação digital, com ênfase para o padrão de ingresso do Brasil nas tecnologias digitais. A Seção 3, na sequência, formaliza o procedimento metodológico adotado. Posteriormente, as Seções 4 e 5 compilam as evidências descritivas e os resultados empíricos. Finalmente, a Seção 6 realiza algumas considerações finais.

2. Mudança estrutural, tecnológica e política industrial na era digital

2.1 Mudança estrutural, difusão Tecnológica, Revoluções Tecnológicas e Janelas de Oportunidade

Extensa literatura destaca o papel central da mudança estrutural no desenvolvimento econômico (Lewis, 1954; Prebisch, 1949; Furtado, 1964; Kaldor, 1966; McMillan e Rodrik, 2011). A transferência de mão de obra e capital do setor tradicional para o setor moderno permite elevar a produtividade do trabalho e a taxa de crescimento do produto. Nesse contexto, o setor moderno é a indústria, caracterizada por retornos crescentes de escala e por ser o locus do processo inovativo.

Logo o crescimento econômico sustentado pode ser entendido como um processo de mudança estrutural positivo em favor do setor industrial que, na dimensão do produto, se expressa na alteração da composição setorial da economia. Assim, ao longo do desenvolvimento, a predominância inicial do setor tradicional, formado pela agricultura e pelos serviços tradicionais, é gradualmente substituída pelo setor moderno, representado pela indústria. Desse modo, a aceleração e a sustentação do crescimento econômico dependem da industrialização e da manutenção de um parque industrial dinâmico, bem articulado e focado na melhoria contínua da produtividade.

Kaldor (1966; 1981) enfatizou a importância da indústria ao distinguir as atividades manufatureiras, marcadas por retornos crescentes de escala, das atividades agrícolas e de mineração, associadas a retornos decrescentes de escala. Essa distinção é fundamental porque a atividade industrial opera com retornos crescentes dinâmicos, derivados de *learning by doing*, externalidades positivas e *spillovers* tecnológicos, o que favorece o crescimento da produtividade da economia como um todo. Dessa forma, a composição setorial da economia importa para entender os efeitos de longo prazo do crescimento econômico dos países.

A literatura neoschumpeteriana concebe o desenvolvimento capitalista como um processo marcado por ondas longas de progresso técnico associadas a revoluções tecnológicas, estruturadas em torno de fatores-chave caracterizados por ampla aplicabilidade, elevado potencial de difusão e queda acelerada de custos relativos (Freeman; Perez, 1988; Perez, 2002). A difusão dessas tecnologias ocorre de forma estruturalmente heterogênea entre setores e países, iniciando-se tipicamente em atividades intensivas em conhecimento e P&D, ou em novos setores, e expandindo-se, posteriormente, conforme as capacidades tecnológicas, organizacionais e institucionais acumuladas.

Essa abordagem é central para compreender a adoção de tecnologias digitais na indústria. No paradigma das Tecnologias da Informação e Comunicação (TICs), setores como eletrônica, informática e telecomunicações lideraram a incorporação tecnológica, enquanto setores tradicionais apresentaram processos de adoção mais lentos e predominantemente incrementais, contribuindo para a reprodução — e, em alguns contextos, o aprofundamento — das heterogeneidades produtivas preexistentes (Freeman; Soete, 1997).

No debate contemporâneo, permanece a controvérsia sobre se tecnologias como computação em nuvem, IoT, IA, big data, robótica avançada, manufatura aditiva, RA e RV representam um aprofundamento da revolução das TICs ou uma nova ruptura tecnológica. Enquanto parte da literatura enfatiza a continuidade, associada à digitalização ampliada e à conectividade em tempo real (Brynjolfsson; McAfee, 2014; Baldwin, 2019), outros autores destacam o potencial sistêmico dessas tecnologias, especialmente quando combinadas, para redefinir a organização da produção, o emprego e as dinâmicas de inovação (Schwab, 2016; Cockburn; Henderson; Stern, 2018).

À luz desse debate, os resultados empíricos indicam que apenas um subconjunto das tecnologias digitais analisadas apresenta potencial para desencadear mudanças de paradigma tecno-produtivo. Tecnologias associadas à automação física, à integração ciberfísica e à reorganização profunda dos processos produtivos — como robótica industrial, manufatura aditiva e análise avançada de big data — exibem padrões de difusão seletivos e concentrados em setores de média-alta e alta intensidade tecnológica,

comportamento consistente com a interpretação neoschumpeteriana de que tecnologias capazes de redefinir trajetórias e regimes produtivos tendem, em suas fases iniciais, a se concentrar em setores próximos à fronteira tecnológica (Dosi, 1982; Freeman; Perez, 1988; Breschi; Malerba, 1997).

O pano de fundo dessa discussão é a noção de “janelas de oportunidade” para o desenvolvimento, segundo a qual períodos iniciais de difusão de novas tecnologias, quando trajetórias tecnológicas ainda não estão plenamente consolidadas e não há um design dominante, poderiam ser explorados por economias em desenvolvimento para reduzir distâncias tecnológicas e construir novas vantagens competitivas (Perez; Soete, 1988; Lee; Malerba, 2017). No entanto, a literatura neoschumpeteriana enfatiza que a capacidade de aproveitar essas janelas depende criticamente das estratégias das firmas e das capacidades tecnológicas previamente acumuladas, entendidas como competências de aprendizagem, engenharia e organização interna das firmas (Bell; Pavitt, 1993; Bell, 2009), bem como por fatores institucionais e sistêmicos mais amplos (Lall, 1992; Cimoli; Dosi; Stiglitz, 2009).

Evidências mais recentes reforçam que tais capacidades continuam sendo determinantes centrais para a adoção de tecnologias digitais avançadas, sobretudo em economias em desenvolvimento, nas quais processos de aprendizado são fortemente cumulativos e desiguais entre setores (Lee; Malerba, 2017; Cirera; Maloney, 2017). Nesse sentido, embora a atual revolução digital amplie o conjunto de oportunidades tecnológicas, sua apropriação tende a reproduzir — e, em alguns casos, aprofundar — a heterogeneidade setorial característica da economia brasileira, a menos que seja acompanhada por estratégias deliberadas de fortalecimento das capacidades tecnológicas domésticas.

No que se refere aos diferentes tipos de tecnologias digitais, a literatura sobre difusão tecnológica tem enfatizado que a adoção de novas tecnologias pelas firmas é um processo heterogêneo, condicionado por fatores organizacionais, tecnológicos e institucionais. No entanto, estudos mais recentes sugerem que essa heterogeneidade não se limita às características das firmas ou dos setores, mas está também relacionada à natureza específica das tecnologias adotadas. No caso das tecnologias digitais, evidências empíricas indicam que os determinantes da adoção variam de forma sistemática entre tecnologias baseadas predominantemente em software e serviços, como a computação em nuvem, e tecnologias que exigem transformações mais profundas nos processos produtivos, como robótica avançada e MA (Frank *et al.*, 2019; Kinkel; Zink, 2017).

A computação em nuvem é uma das tecnologias digitais mais amplamente analisadas na literatura empírica, frequentemente estudada a partir de modelos de aceitação tecnológica, como o *Technology Acceptance Model* (TAM), e de frameworks organizacionais, como o *Technology–Organization–Environment* (TOE). As evidências indicam que sua adoção é influenciada por fatores como utilidade percebida, escalabilidade e redução de custos de infraestrutura de TI, bem como pelo suporte da alta gestão e pela pressão competitiva (Low; Chen; Wu, 2011; Marston *et al.*, 2011). Do ponto de vista do desempenho, estudos internacionais mostram que a computação em nuvem está associada a ganhos de produtividade do trabalho e da produtividade total dos fatores, sobretudo por ampliar a eficiência gerencial e reduzir barreiras de entrada à digitalização, com impactos particularmente relevantes para pequenas e médias empresas (Andrews; Criscuolo; Gal, 2016).

No caso da IoT, a literatura destaca determinantes fortemente associados à infraestrutura técnica e à capacidade de integração de sistemas. A adoção dessa tecnologia exige investimentos complementares em sensores, conectividade e gestão de dados, o que torna a maturidade da infraestrutura digital e as competências internas fatores centrais do processo decisório (Nguyen; Simkin; Canhoto, 2022). Evidências empíricas sugerem que a IoT pode gerar ganhos de produtividade ao viabilizar o monitoramento em tempo real e a manutenção preditiva, embora os efeitos sejam mais frequentes em empresas com maior complexidade operacional. Em setores industriais tradicionais, a adoção tende a ser parcial e incremental, limitando seus impactos sobre a produtividade agregada (Kinkel; Zink, 2017).

As tecnologias de *big data analytics* e *machine learning* apresentam determinantes ainda mais seletivos. A literatura converge para a interpretação de que sua adoção depende criticamente da disponibilidade e qualidade dos dados e da existência de capital humano especializado. Evidências *firm-level* indicam que empresas que utilizam análise avançada de dados apresentam níveis significativamente mais elevados de produtividade total dos fatores, refletindo melhor tomada de decisão e coordenação interna (Brynjolfsson; Hitt; Kim, 2011). Contudo, os retornos são fortemente condicionados por

capacidades organizacionais complementares, o que tende a concentrar a adoção dessas tecnologias em grandes empresas e setores próximos à fronteira tecnológica, especialmente nas economias em desenvolvimento (Cirera; Maloney, 2017).

A adoção de robótica avançada apresenta determinantes distintos daqueles associados às tecnologias digitais baseadas em software. Evidências internacionais mostram que a difusão de robôs industriais contribuiu de forma significativa para o crescimento da produtividade do trabalho e da produtividade total dos fatores na manufatura, configurando um dos vetores mais robustos de automação produtiva observados empiricamente (Graetz; Michaels, 2018). No entanto, sua adoção é fortemente condicionada pela estrutura produtiva, pela intensidade de capital e pela escala das firmas, o que limita sua difusão e reforça padrões de heterogeneidade estrutural (Acemoglu; Restrepo, 2020).

A manufatura aditiva, por sua vez, apresenta um padrão de adoção menos orientado à automação em larga escala e mais associado à flexibilidade produtiva, à customização e à redução do tempo de desenvolvimento de produtos. Estudos empíricos indicam que sua adoção pode gerar ganhos de eficiência e produtividade em setores caracterizados por elevada complexidade do design, como aeroespacial, saúde e bens de capital (Ford; Despeisse, 2016; Holmström *et al.*, 2016). Entretanto, a literatura também aponta que, em muitos contextos industriais, essa tecnologia permanece restrita a atividades de prototipagem e testes, com efeitos limitados sobre a produtividade agregada.

Por fim, uma vertente crescente da literatura enfatiza que os maiores ganhos de produtividade decorrem da adoção combinada de múltiplas tecnologias digitais. Brynjolfsson, Rock e Syverson (2021) indicam que firmas que integram computação em nuvem, análise de dados, automação e IA apresentam ganhos de produtividade superiores aos observados na adoção isolada de cada tecnologia, refletindo complementaridades tecnológicas e organizacionais. Esses resultados reforçam a interpretação de que os efeitos da digitalização são sistêmicos e dependem do acúmulo prévio de capacidades produtivas e organizacionais.

2.2 Heterogeneidade Tecnológica e Políticas para a Digitalização Industrial

A experiência internacional mostra que a transformação digital da indústria de transformação tem sido conduzida por meio de políticas industriais ativas, seletivas e orientadas por tecnologias (Cimoli; Dosi; Stiglitz, 2009; Mazzucato, 2011). Na Alemanha, a estratégia de ingresso na indústria 4.0 articula pesquisa aplicada, padronização tecnológica, formação de capital humano e coordenação entre empresas, universidades e institutos de pesquisa, com foco na digitalização dos processos produtivos e na integração de sistemas ciberfísicos, priorizando tecnologias de produção avançada como automação inteligente, robótica industrial e IoT (Kagermann; Wahlster; Helbig, 2013; Alemanha, 2020).

Nos Estados Unidos, políticas como a *Advanced Manufacturing Partnership* e o *CHIPS and Science Act* combinam instrumentos tradicionais de apoio à inovação com uma estratégia explícita de reindustrialização tecnológica, direcionando recursos públicos para semicondutores, IA e automação avançada, reconhecidas como infraestruturas críticas para a competitividade industrial e a segurança econômica, por meio de subsídios, financiamento à P&D, compras governamentais e fortalecimento de ecossistemas regionais de inovação (Estados Unidos, 2011; 2022).

De forma complementar, a Coreia do Sul e a China adotam estratégias fortemente coordenadas pelo Estado, voltadas à difusão e à internalização de capacidades tecnológicas. A Coreia do Sul combina programas de *smart manufacturing* e uma política nacional de IA com investimentos em infraestrutura digital, qualificação de recursos humanos e apoio direto à adoção tecnológica por pequenas e médias empresas, reduzindo barreiras de escala e acelerando a incorporação de tecnologias complexas (Coreia do Sul, 2021). Já a China, por meio do plano *Made in China 2025*, estabelece metas explícitas para o desenvolvimento de setores estratégicos, como robótica, IA e manufatura avançada, articulando financiamento direcionado, incentivos fiscais, apoio estatal à P&D e metas de conteúdo local, com o objetivo de promover o *catching up* tecnológico e consolidar empresas nacionais líderes (China, 2015).

Em conjunto, essas experiências indicam que a efetividade da digitalização industrial depende da articulação entre políticas tecnológicas seletivas e o fortalecimento das capacidades produtivas, organizacionais e institucionais das firmas domésticas. A ausência de instrumentos diferenciados tende a reforçar padrões de adoção imitativos e a reproduzir a heterogeneidade estrutural existente. Nesse sentido,

a efetividade das estratégias nacionais de digitalização industrial depende da capacidade de articular políticas tecnológicas capazes de priorizar e direcionar os recursos para tecnologias específicas, que demandam maior integração física (Cimoli; Dosi; Stiglitz, 2009; Mazzucato, 2011).

A evidência internacional sugere que a diferença entre países que apenas adotam tecnologias digitais e aqueles que efetivamente as dominam reside no grau de agressividade, seletividade e coordenação das políticas públicas. Nos casos da Alemanha, Estados Unidos, Coreia do Sul e China, a difusão de tecnologias como robótica, manufatura aditiva e inteligência artificial industrial foi acompanhada por políticas explícitas de financiamento à P&D, compras governamentais estratégicas, padronização tecnológica, formação de capital humano especializado e fortalecimento de ecossistemas nacionais de inovação. Nessas experiências, o Estado atua não apenas como facilitador da adoção, mas como agente coordenador da acumulação de capacidades produtivas e tecnológicas, criando condições para que firmas domésticas internalizem o aprendizado e ocupem posições centrais nas trajetórias tecnológicas emergentes, em linha com a abordagem de política industrial defendida por Cimoli, Dosi e Stiglitz (2009) e Mazzucato (2011).

No contexto brasileiro, o debate sobre transformação digital e política industrial ganhou novo impulso com o lançamento do Programa Nova Indústria Brasil (NIB), que reconhece explicitamente a heterogeneidade estrutural da indústria brasileira e a necessidade de políticas diferenciadas para promover a difusão de tecnologias digitais avançadas. Ao priorizar missões associadas à digitalização, à sustentabilidade e ao fortalecimento de cadeias produtivas estratégicas, a NIB sinaliza a importância de combinar instrumentos horizontais com ações orientadas à inovação. Todavia, à luz das evidências empíricas apresentadas neste artigo, observa-se que sua capacidade de diferenciar políticas segundo a natureza específica das tecnologias digitais permanece limitada. O desenho atual privilegia recortes setoriais e missões amplas, carecendo de instrumentos calibrados às exigências técnicas, organizacionais e de aprendizado associadas a tecnologias com maior potencial de transformação estrutural, como robótica, manufatura aditiva e aplicações industriais de IA (Brasil, 2024).

2.3 Evidências empíricas para o Brasil

As evidências empíricas para o Brasil convergem para a interpretação, amplamente documentada pela literatura de inovação, de que a difusão de tecnologias digitais ocorre de forma estruturalmente heterogênea, reproduzindo assimetrias históricas relacionadas ao porte das firmas, à estrutura setorial e à intensidade tecnológica. Esse padrão está alinhado à tradição neoschumpeteriana aplicada ao contexto brasileiro, segundo a qual os processos de aprendizado tecnológico são cumulativos, dependentes de trajetórias e condicionados pelas capacidades previamente acumuladas por firmas e setores (Lall, 1992; Bell; Pavitt, 1993; Coutinho; Ferraz, 1994). Essa interpretação é reforçada por mapeamentos recentes em larga escala da indústria brasileira, que evidenciam a natureza estrutural e setorialmente concentrada da difusão das tecnologias digitais e que mostram que a incorporação de tecnologias da Indústria 4.0 permanece fortemente associada à estrutura produtiva e às assimetrias de capacidades entre setores e firmas (IEL, 2018; Kupfer; Ferraz; Torracca, 2019; Ferraz; Kupfer; Torracca, 2020; IBGE, 2024).

Dados da Pesquisa de Inovação Tecnológica (PINTEC), realizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), indicam que tecnologias digitais mais padronizadas e maduras como computação em nuvem, sistemas integrados de gestão (ERP) e automação digital apresentam taxas de adoção significativamente superiores às de tecnologias mais complexas e intensivas em conhecimento, como inteligência artificial (IA), robótica colaborativa e manufatura aditiva (MA) (IBGE, 2023; IBGE, 2025). Esse resultado sugere que a digitalização da indústria brasileira tem avançado predominantemente por meio de soluções com menores barreiras tecnológicas e menor exigência de capacidades internas de pesquisa e desenvolvimento.

Segundo a PINTEC 2022, cerca de 84% das empresas industriais inovadoras declararam utilizar ao menos uma tecnologia digital associada à automação ou à gestão da informação, com destaque para softwares de gestão integrada e soluções em nuvem (IBGE, 2023). Dados mais recentes da PINTEC 2024 apontam para um avanço na adoção de tecnologias mais sofisticadas, como IA e análise de big data, ainda que restrito a um subconjunto de empresas, majoritariamente de grande porte e inseridas em setores de maior intensidade tecnológica (IBGE, 2025).

Estudos empíricos baseados nesses dados mostram que a probabilidade de adoção de IA e big data aumenta significativamente com o porte da firma, o esforço interno de P&D e a inserção em cadeias globais de valor (De Negri; Turchi, 2018; Kubota; De Negri, 2021; Urraca-Ruiz et al., 2023). Mesmo quando incorporadas, essas tecnologias tendem a ser adotadas de forma fragmentada, com limitada integração estratégica aos processos de inovação, caracterizando um padrão de digitalização incremental e heterogêneo (Stradioto; Frazzon, 2023; Reis, 2021). Esse padrão também dialoga com a literatura internacional sobre capacidades de absorção (*absorptive capacity*) e complementaridades organizacionais, segundo a qual a adoção efetiva de tecnologias avançadas depende não apenas do acesso, mas da capacidade das firmas de integrá-las a rotinas produtivas, práticas gerenciais e estratégias de inovação, sendo essas capacidades particularmente limitadas em economias em desenvolvimento (Cohen; Levinthal, 1990; Teece, 1986; Milgrom; Roberts, 1995; Cirera; Maloney, 2017).

No que se refere à robótica industrial e à manufatura aditiva, a literatura aponta um atraso relativo do Brasil em comparação a economias avançadas e países asiáticos. Dados da International Federation of Robotics (IFR) indicam baixa densidade robótica na indústria brasileira, concentrada principalmente nos setores automotivo e de bens de capital, com limitada difusão em segmentos industriais tradicionais (IFR, 2023). Evidências internacionais baseadas na própria IFR mostram que a adoção de robôs industriais é fortemente concentrada em um conjunto restrito de setores, automotivo, eletrônicos e metal-mecânico, refletindo diferenças estruturais na intensidade tecnológica e implicando efeitos diferenciados sobre produtividade e emprego entre indústrias (Acemoglu; Restrepo, 2020). Estudos do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) mostram que a adoção dessas tecnologias ocorre predominantemente como estratégia de modernização incremental de plantas existentes, com reduzida integração a atividades de engenharia, design e desenvolvimento tecnológico próprio (IPEA, 2021; IPEA, 2022).

Análises sobre Internet das Coisas (IoT) e big data reforçam esse diagnóstico. Evidências indicam que projetos de IoT no Brasil concentram-se em aplicações de monitoramento, rastreamento e manutenção preditiva, com menor incidência de usos voltados à otimização sistêmica da produção ou à inovação de produtos (Kubota, 2019; Araújo; Cavalcante; Alves, 2020). De forma semelhante, o uso de big data e analytics tende a se restringir a funções de apoio à gestão, marketing e logística, sendo menos frequente sua integração a processos decisórios estratégicos ou ao desenvolvimento tecnológico de longo prazo.

A literatura também destaca a presença de restrições estruturais relevantes à difusão das tecnologias associadas à Indústria 4.0 no Brasil. Entre elas, sobressaem a escassez de mão de obra qualificada, a baixa intensidade de P&D empresarial e a fraca articulação entre empresas e o sistema científico e tecnológico, o que resulta em estratégias predominantemente imitativas baseadas na aquisição de tecnologias desenvolvidas no exterior (IPEA, 2021; IPEA, 2022). Relatórios do BNDES e do IEDI complementam esse diagnóstico ao evidenciar que os investimentos em tecnologias digitais permanecem concentrados em grandes empresas, frequentemente integradas a cadeias globais de valor, além de destacar o papel dos instrumentos públicos, como financiamento, compras governamentais e mecanismos de compartilhamento de riscos, na viabilização da adoção tecnológica, especialmente para micro, pequenas e médias empresas (BNDES, 2021; BNDES, 2023; IEDI, 2025).

Evidências adicionais baseadas em microdados e análises setoriais confirmam que a adoção de tecnologias digitais avançadas no Brasil está fortemente associada ao porte das firmas, à intensidade tecnológica e às capacidades internas de inovação, sendo mais concentrada em empresas maiores e em setores próximos à fronteira tecnológica (Urraca-Ruiz et al., 2023). Esse padrão é consistente com análises institucionais que apontam que a difusão de tecnologias como robótica, manufatura aditiva e inteligência artificial permanece seletiva e condicionada por capacidades produtivas e organizacionais previamente acumuladas (CNI, 2018; IEDI, 2017).

Assim, a literatura empírica recente converge para o diagnóstico de que a transformação digital da indústria brasileira ocorre de forma cumulativa, seletiva e estruturalmente heterogênea. Observa-se maior difusão de tecnologias digitais de uso geral, como computação em nuvem e sistemas de gestão, em contraste com a limitada incorporação de tecnologias mais complexas associadas à automação avançada e à integração ciberfísica. Esse padrão reforça a persistência da heterogeneidade estrutural e indica que, embora ampliem oportunidades competitivas, as tecnologias digitais tendem a reproduzir desigualdades

preexistentes, fundamentando a necessidade de políticas industriais e de inovação orientadas e seletivas (IBGE, 2023; IBGE, 2025).

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para fins de delimitação empírica, as informações utilizadas neste estudo são provenientes da Pesquisa de Inovação Semestral (PINTEC), considerando as edições mais recentes disponíveis para os anos de 2022 e 2024. O universo da análise compreende as empresas da indústria de transformação abrangidas pela pesquisa, não se restringindo apenas às firmas inovadoras. As taxas de adoção das tecnologias digitais são construídas a partir da proporção de empresas que declararam utilizar determinada tecnologia em cada divisão da CNAE 2.0. Nesse contexto, “adoção” refere-se à declaração de uso da tecnologia em alguma atividade da empresa, seja em processos produtivos, atividades de gestão ou funções de apoio, não implicando necessariamente uso intensivo, integração plena aos sistemas produtivos ou aplicação em escala industrial. As proporções setoriais são calculadas com base nos dados amostrais da PINTEC, respeitando a estrutura de ponderação da pesquisa, de modo a garantir representatividade estatística. Assim, a taxa de adoção deve ser interpretada como a participação relativa de empresas que reportam utilizar determinada tecnologia, e não como uma medida da intensidade de uso, do volume de capital incorporado ou do grau de sofisticação da aplicação tecnológica.

Regressões individuais são estimadas para identificar padrões sistemáticos de heterogeneidade setorial na adoção de cada tecnologia digital. Para isso, a variável dependente é especificada como a intensidade relativa de difusão das tecnologias digitais entre os setores industriais, definida como a proporção de empresas que adotaram a tecnologia digital. Formalmente, expressamos a variável de interesse da seguinte forma:

$$Adoc_{sk} = \frac{N_{sk}^{adot}}{N_{sk}^{total}}, \tag{1}$$

em que $Adoc_{sk}$ é a proporção de empresas da divisão CNAE 2.0 s que adotaram a tecnologia k ; N_{sk}^{adot} é o número de empresas que adotaram a tecnologia k e N_{sk}^{total} é o número total de empresas da respectiva divisão CNAE 2.0.

Entre as variáveis explicativas, **Quadro 1**, o porte médio das empresas é mensurado pela proporção de empresas médias (*Media*) e grandes (*Grande*) em cada divisão CNAE 2.0. Fatores que a literatura associa positivamente à adoção de tecnologias digitais e à incorporação de sistemas produtivos intensivos em capital e conhecimento (Hall; Lerner, 2010; Reis, 2021).

As capacidades tecnológicas internas são mensuradas por duas variáveis complementares. A primeira refere-se à proporção de empresas com pessoal ocupado de nível superior (*Sup*). Essa variável está diretamente relacionada ao conceito de capacidade de absorção, refletindo a habilidade das firmas de identificar, assimilar e explorar conhecimentos externos. Evidências recentes para a indústria brasileira apontam o capital humano qualificado como um dos principais determinantes da adoção de tecnologias relacionadas à Indústria 4.0 (Urraca-Ruiz *et al.*, 2023; Santos *et al.*, 2023).

Quadro 1 – Definição das variáveis utilizadas na análise

Sigla	Descrição	Fonte
<i>Adoc_{sk}</i>	Proporção de empresas que adotaram a tecnologia, em percentual	PINTEC (2024)
<i>Média</i>	Proporção de empresas médias, com 50 a 249 trabalhadores, em percentual	PINTEC (2024)
<i>Grande</i>	Proporção de empresas grandes, com mais de 250 trabalhadores, em percentual	PINTEC (2024)
<i>Sup</i>	Proporção de empresas com pessoal ocupado de nível superior, em percentual	PINTEC (2024)
<i>PoTec</i>	Proporção de Pessoal técnico-científico, em percentual	RAIS (2024)
<i>P&D</i>	Proporção de empresas com atividades de P&D, em percentual	PINTEC (2024)
<i>Média-Alta</i>	Dummy para setores de média-alta intensidade tecnológica	OCDE (2011)
<i>Alta</i>	Dummy para setores de alta intensidade tecnológica	OCDE (2011)

Fonte: Os autores

A segunda é o Pessoal técnico-científico (*PoTec*), definido como a proporção de trabalhadores em ocupações técnico-científicas, identificadas com base na Classificação Brasileira de Ocupações. Essa

medida é utilizada como indicador da presença de competências em engenharia, tecnologia da informação e atividades técnico-científicas, consideradas essenciais para a implementação, operação e integração de tecnologias digitais avançadas, como IA, robótica e MA (Araújo; Cavalcante; Alves, 2009).

O esforço inovativo (*P&D*) é capturado pela proporção de empresas que realizam atividades internas de pesquisa e desenvolvimento. A literatura destaca que atividades internas de *P&D* não apenas favorecem a inovação própria, mas também ampliam a capacidade das firmas em absorver tecnologias externas, reforçando o papel complementar entre *P&D* e adoção tecnológica (Breschi; Malerba, 2001; Reis, 2021).

Finalmente, as características estruturais são identificadas por meio de duas variáveis que identificam setores de Média-Alta e Alta intensidade tecnológica, conforme a classificação da OCDE (2011). Essa estratégia permite testar a hipótese de que setores mais próximos à fronteira tecnológica apresentam maior propensão à adoção de tecnologias digitais, em função de trajetórias tecnológicas mais dinâmicas, maior pressão competitiva e maior integração com cadeias globais de valor intensivas em conhecimento (Cardoso; Brum, 2024). Por outro lado, essa abordagem inviabiliza obter informações sobre a heterogeneidade intra-setorial, uma vez que mesmo dentro de um mesmo setor ou categoria tecnológica, podem existir empresas com níveis distintos de produtividade, capacidade inovativa, de gestão e de investimento.

No que se refere aos procedimentos estatísticos adotados, inicialmente se realiza uma análise de correlação entre a proporção de adoção das tecnologias digitais ($Adoc_{skt}$) e as demais variáveis. Para as variáveis contínuas expressas em proporções, como porte médio das empresas, capital humano (Sup) e pessoal técnico-científico ($PoTec$), utiliza-se o coeficiente de correlação de Pearson. Já para a associação entre $Adoc_{sk}$ e as variáveis binárias que identificam setores de média-alta e alta intensidade tecnológica, adota-se a correlação ponto-bisserial, apropriada para mensurar a associação entre uma variável contínua e uma variável dicotômica. Esse procedimento permite captar diferenças estruturais na difusão das tecnologias digitais entre grupos tecnológicos distintos.

Para examinar a existência de heterogeneidade sistemática na adoção das tecnologias digitais entre setores classificados por intensidade tecnológica é conduzida uma análise de variância (ANOVA). Antes da interpretação dos resultados, são avaliados os pressupostos do modelo, incluindo a normalidade dos resíduos, testada pelo teste de Shapiro–Wilk, e a homogeneidade das variâncias entre os grupos, verificada pelo teste de Levene. Nos casos em que esses pressupostos não são atendidos, recorre-se ao teste não paramétrico de Kruskal–Wallis, que permite avaliar diferenças estatisticamente significativas entre os grupos tecnológicos sem exigir hipóteses estritas sobre a distribuição dos erros.

Finalmente, estimam-se regressões por Mínimos Quadrados Ordinários, precisamente:

$$Adoc_{sk} = \beta_0 + \beta_1 Média_{sk} + \beta_2 Grande_{sk} + \beta_3 Média - Alta_{sk} + \beta_4 Alta_{sk} + \beta_5 Sup_{sk} + \beta_6 PoTec_{sk} + \varepsilon_{sk}, \quad (2)$$

em que $\beta_0, \dots, \beta_6$ são os coeficientes a serem estimados e ε_{sk} representa o termo de erro aleatório. A variável dependente mede a proporção de empresas que adotaram cada tecnologia digital, enquanto as variáveis explicativas capturam características estruturais relacionadas ao porte das firmas, à intensidade tecnológica setorial e às capacidades tecnológicas internas.

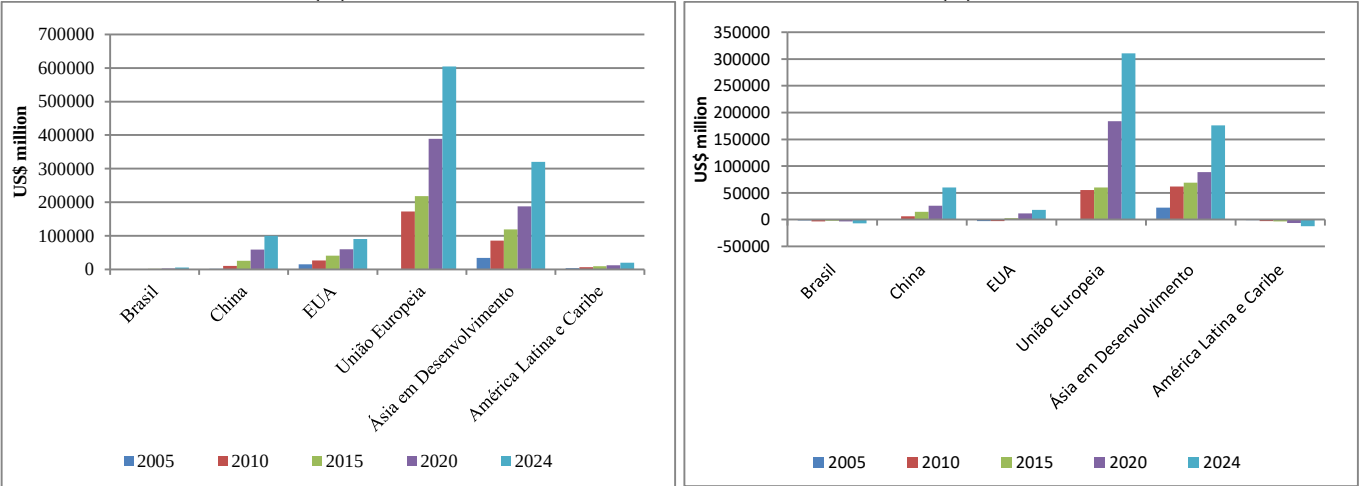
Para assegurar a robustez dos resultados, são realizados testes de diagnósticos adicionais. A presença de heterocedasticidade é verificada por meio do teste de Breusch–Pagan, sendo adotados erros-padrões robustos sempre necessário. A existência de multicolinearidade entre as variáveis explicativas é avaliada por Fator de Inflação da Variância (VIF).

4. EVIDÊNCIAS DESCRITIVAS SOBRE A DIFUSÃO SETORIAL DAS TECNOLOGIAS DIGITAIS

As evidências descritivas apresentadas nesta seção têm como objetivo contextualizar e qualificar os resultados econométricos discutidos na seção seguinte, oferecendo uma visão sintética dos padrões recentes de difusão das tecnologias digitais na indústria de transformação brasileira. Em linha com a literatura neoschumpeteriana, o foco recai sobre a heterogeneidade setorial e sobre as diferenças associadas à natureza das tecnologias adotadas.

Os dados de comércio exterior permitem analisar o grau de competitividade dos países no campo das tecnologias digitais. O **Gráfico 01** mostra a expansão dos serviços digitais, núcleo da chamada economia digital, em que se destacam as atividades relacionadas à infraestrutura de dados, elaboração de softwares e construção de plataformas para oferta de serviços digitais. O Brasil tem baixa participação no comércio exterior de serviços de telecomunicação, computação e serviços de informação (**Gráfico 01 - A**). Esse resultado evidencia baixa capacidade nacional em atividades digitais. Países como China e EUA se destacam com participação cada vez mais crescente, tendo a União Europeia na liderança das exportações.

Gráfico 01 – Exportações (A) e Saldo Comercial (B) em serviços de telecomunicação, computação e serviços de informação, anos selecionados (2005, 2010, 2015, 2020 e 2024).

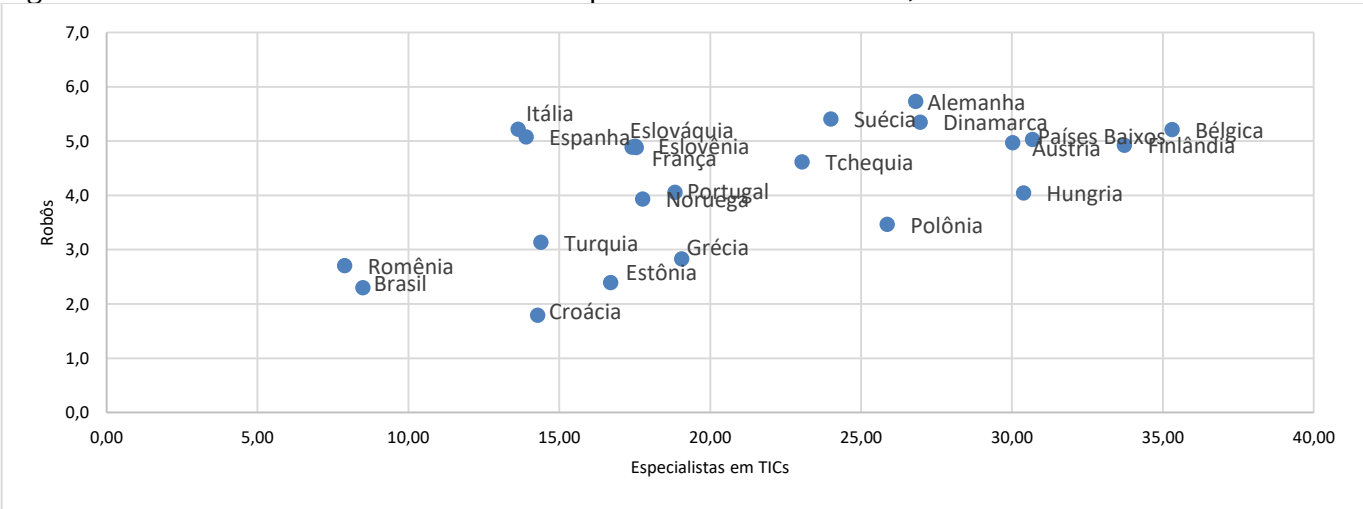


Fonte: UNCTADstat

O saldo do comércio exterior de serviços digitais relacionados à infraestrutura de dados mostra que a União Europeia e a Ásia em desenvolvimento se destacam com superávits crescentes no período em tela (**Gráfico 01 – B**). A América Latina apresenta déficits permanentes, com importante contribuição do Brasil.

O Brasil apresenta posição relativa desfavorável no que se refere ao acesso e uso de TICs e à adoção de IA pelas empresas manufatureiras. Também exibe baixo grau de automação física da produção, medido pela densidade de robôs industriais por trabalhador (**Gráfico 02**). Esse descompasso sugere que a digitalização no país tem se concentrado predominantemente em tecnologias baseadas em software e gestão da informação, sem se traduzir, na mesma proporção, em transformações profundas nos processos produtivos físicos.

Gráfico 02 – Percentual de empresas manufatureiras que empregam especialistas em TIC, 2024, e logaritmo do número de robôs na manufatura por 10.000 trabalhadores, 2023

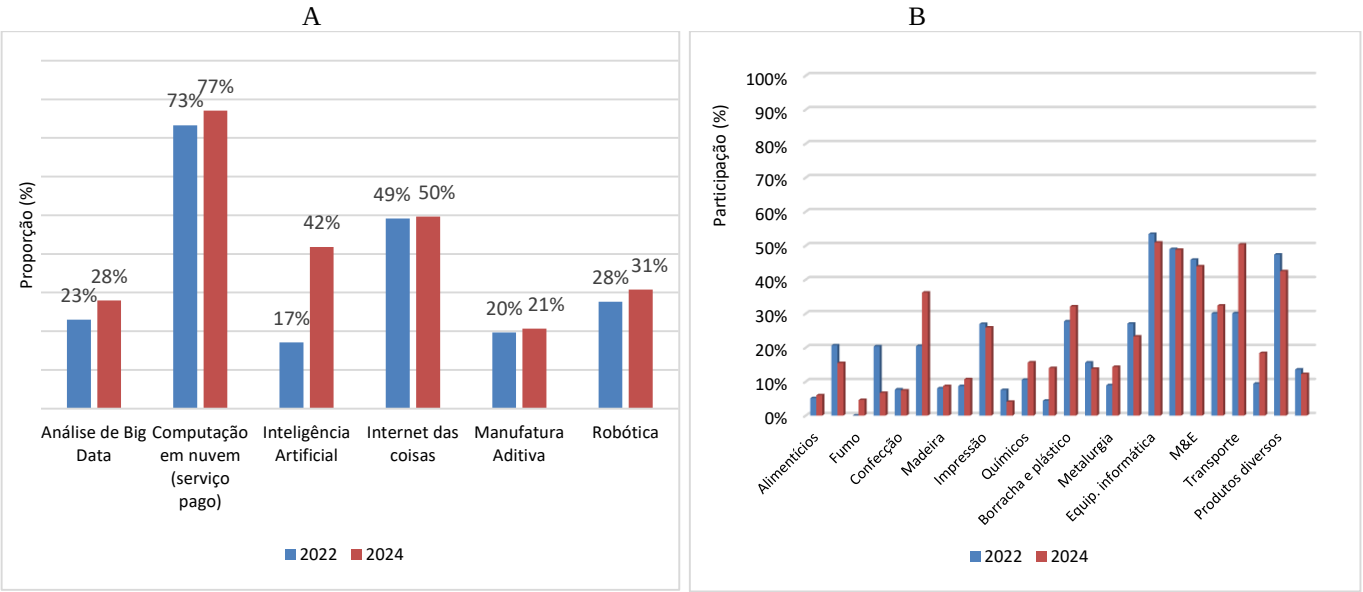


Fonte: Adaptado de OCDE (2026) e IFR (2023). Nota: Número de especialistas em ICT na indústria de transformação para o Brasil em 2023.

O Brasil apresenta posição relativa desfavorável no que se refere ao acesso e uso de TICs e à adoção de IA pelas empresas manufatureiras. Também exibe baixo grau de automação física da produção, medido pela densidade de robôs industriais por trabalhador (**Gráfico 02**). Esse descompasso sugere que a digitalização no país tem se concentrado predominantemente em tecnologias baseadas em software e gestão da informação, sem se traduzir, na mesma proporção, em transformações profundas nos processos produtivos físicos.

No plano doméstico, os dados da Pesquisa de Inovação (PINTEC), **Gráfico 03 - A**, indicam que a proporção de empresas da indústria de transformação que adotaram ao menos uma tecnologia digital é elevada e apresentou crescimento entre 2022 e 2024. A IA destaca-se como a tecnologia com maior expansão recente, inclusive em setores tradicionalmente menos intensivos em tecnologia, o que reflete seu caráter pervasivo e a redução relativa das barreiras de entrada (IBGE, 2023; 2025).

Gráfico 03 – Proporção de empresas que adotaram tecnologias digitais, por tipo de tecnologia adotada (%); B) Proporção de empresas que empregam Manufatura aditiva, por Cnae 2.0 (%)

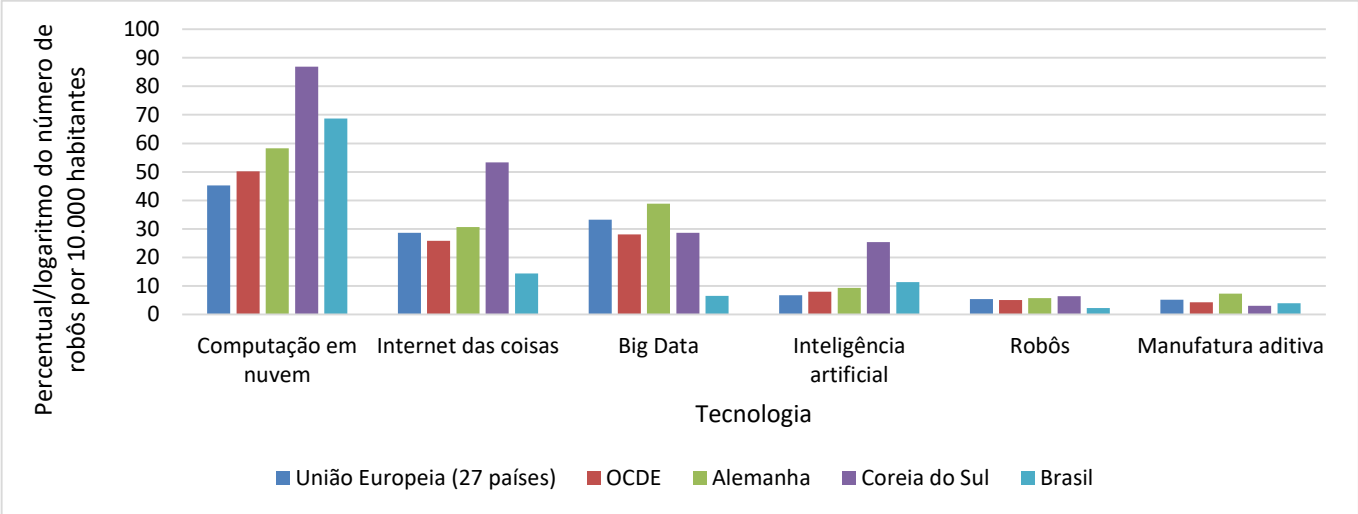


Fonte: Adaptado de IBGE (2023, 2025)

Todavia, a análise desagregada por divisões industriais revela a persistência de forte heterogeneidade setorial na adoção de tecnologias como MA, **Gráfico 03 - B**. Setores de maior intensidade tecnológica, como Máquinas e Equipamentos (M&E), produtos químicos, farmoquímicos e equipamentos de transporte, exibem níveis sistematicamente mais elevados de adoção, enquanto setores tradicionais ficam em patamares inferiores (IBGE, 2023; 2025).

Essa heterogeneidade torna-se mais pronunciada quando se considera o tipo de tecnologia digital adotada, **Gráfico 04**. Tecnologias de uso mais geral e baseadas predominantemente em software, como a computação em nuvem, apresentam difusão ampla e relativamente homogênea entre os países, configurando-se como infraestrutura digital básica. Em contraste, tecnologias mais complexas e intensivas em capital físico, engenharia e reorganização produtiva — como robótica e MA — exibem níveis médios de adoção mais baixos, indicando barreiras estruturais à sua difusão.

Gráfico 04 – Logaritmo do número de robôs por 10.000 trabalhadores e Percentual de empresas com acesso, por tecnologia (%)



Fonte: OCDE (2026) e Eurostat (2026). Notas: Dados extraídos da OCDE para 2023, exceto MA, disponibilizados pela União Europeia para 2019. Número de Robôs na OCDE calculados a partir da média para América do Norte e União Europeia. Dados de MA para o Brasil tabulados da OCDE para 2021.

Assim, as evidências descritivas sugerem que a digitalização ocorre de forma assimétrica, sendo mais profunda nas tecnologias digitais de menor complexidade relativa. Esse padrão é consistente com a hipótese de que a atual onda de digitalização tende a reproduzir a heterogeneidade estrutural preexistente, reforçando a necessidade de políticas industriais e tecnológicas voltadas ao fortalecimento das capacidades produtivas e organizacionais domésticas. Esses resultados motivam e fundamentam os testes empíricos da seção seguinte.

5. RESULTADOS EMPÍRICOS

Os resultados empíricos obtidos corroboram de forma consistente as previsões da literatura neoschumpeteriana acerca da difusão tecnologicamente desigual das inovações ao longo da estrutura produtiva. As estatísticas descritivas apresentadas na **Tabela 01** evidenciam padrões claros de heterogeneidade na adoção das tecnologias digitais entre os setores industriais. A computação em nuvem apresenta a maior taxa média de adoção (77,5%) e o menor coeficiente de variação, indicando uma difusão ampla e relativamente homogênea. Esse resultado é compatível com a literatura que caracteriza a computação em nuvem como uma tecnologia digital de uso geral, com baixos custos de adoção, reduzida irreversibilidade dos investimentos e menor dependência de capacidades tecnológicas previamente acumuladas (Andrews; Criscuolo; Gal, 2016; Armstrong *et al.*, 2016).

Tabela 01 – Estatísticas descritivas dos níveis de adoção das tecnologias digitais

Estatística	Big data	Computação em Nuvem	IA	IoT	MA	Robótica
Média	28,4%	77,5%	41,1%	47,9%	22,4%	30,1%
Desvio Padrão	0,10	0,08	0,13	0,11	0,15	0,11
Coeficiente de variação	0,35	0,10	0,32	0,24	0,69	0,37

Fonte: Os autores

Por outro lado, tecnologias mais diretamente associadas à automação do processo produtivo físico, como MA e robótica, exibem menores médias de adoção (22,4% e 30,1%, respectivamente) e elevados coeficientes de variação, especialmente no caso da MA (0,687), sinalizando forte heterogeneidade

intersectorial. Esse padrão é coerente com os argumentos de Freeman e Soete (1997) e com evidências mais recentes que destacam que tecnologias intensivas em capital físico, engenharia e reorganização produtiva tendem a se concentrar em setores com maior intensidade tecnológica e capacidade de aprendizado acumulado (Graetz; Michaels, 2018; Acemoglu; Restrepo, 2020). Aspectos relacionados aos custos de implantação e os benefícios decorrentes são fatores importantes e se levar em consideração, dado o grau de abertura da economia e o nível de competitividade da indústria brasileira.

Os testes de heterogeneidade setorial por intensidade tecnológica (**Tabela 02**) reforçam esse diagnóstico. Para Big Data, IA, MA e Robótica, os resultados da ANOVA e do teste de Kruskal-Wallis rejeitam a hipótese de igualdade entre os grupos setoriais, indicando que a adoção dessas tecnologias é significativamente maior em setores de média-alta e alta intensidade tecnológica. Esses resultados dialogam diretamente com a literatura que enfatiza o caráter cumulativo e seletivo da difusão tecnológica, segundo a qual a incorporação de tecnologias mais complexas depende criticamente de capacidades tecnológicas, organizacionais e institucionais previamente acumuladas (Bell; Pavitt, 1993; Bell, 2009; Lee; Malerba, 2017). Além disso, as atividades de maior intensidade tecnológica, por estarem mais expostas à concorrência internacional tendem a incorporar em suas estratégias a adoção de dispositivos e técnicas de fronteira.

Por outro lado, computação em nuvem e IoT não apresentam evidências robustas de heterogeneidade setorial por intensidade tecnológica, sugerindo um padrão de difusão mais transversal. Evidências que caracterizam essas tecnologias baseadas em software complementares à gestão e à integração de sistemas, possuem barreiras de entrada relativamente menores em termos de custo e conhecimento prévio quando comparadas à robótica ou à manufatura aditiva, cuja adoção também depende de aspectos físicos, como investimentos em infraestrutura e integração técnica (Kinkel; Zink, 2017; Nguyen; Simkin; Canhoto, 2022).

Tabela 02 – Testes Anova e de Kruskal-Wallis para heterogeneidade setorial por intensidade tecnológica

Tecnologia	p-valor		p-valor		p-valor	
	Shapiro-Wilk	Levene	Anova		Kruskal-Wallis	P-valor
Big data	0,555	0,238	4,68*	0,012	11,0*	0,012
Computação em Nuvem	0,110	0,895	2,1	0,132	6,38	0,094
IA	0,698	0,022*	6,27*	0,003	9,67*	0,022
IoT	0,965	0,662	1,35	0,287	2,32	0,508
Manufatura aditiva	0,246	0,405	5,38*	0,007	9,11*	0,028
Robótica	0,416	0,743	6,17*	0,004	11,1*	0,011

Fonte: Os autores.

Nota: *Significativo ao nível de confiança de 95%.

A adoção de big data, IA e robótica apresenta correlações positivas e relativamente elevadas com a presença de setores de média-alta e alta intensidade tecnológica, bem como com capital humano (Sup) e PoTec (**Tabela 03**). Esse resultado sugere que tecnologias digitais mais complexas e intensivas em conhecimento tendem a se difundir prioritariamente em ambientes produtivos dotados de maiores competências técnicas e organizacionais (Lall, 1992; Bell; Pavitt, 1993; Breschi; Malerba, 2001).

A computação em nuvem exibe correlações positivas, porém mais moderadas, o que é compatível com seu caráter mais padronizado e com menores barreiras à adoção (Hall; Lerner, 2010; Reis, 2021). De forma semelhante, IoT apresenta correlações positivas com capacidades técnicas, ainda que menos intensas do que as observadas para IA e robótica, refletindo sua adoção predominantemente voltada a aplicações específicas de monitoramento e automação (Kubota, 2019; Araújo; Cavalcante; Alves, 2020).

No caso da MA, destaca-se a forte correlação com setores de alta intensidade tecnológica, indicando que sua difusão permanece restrita a segmentos mais próximos da fronteira tecnológica. A robótica industrial combina correlações elevadas com porte empresarial, intensidade tecnológica e pessoal técnico-científico, reforçando seu caráter capital-intensivo e dependente de competências (Hall; Lerner, 2010; Urraca-Ruiz *et al.*, 2023).

Tabela 03 – Correlações entre adoção de tecnologias digitais e características estruturais dos setores industriais

	Média	Grande	Média-Alta	Alta	Sup	PoTec
Big data	-0,15	0,36	0,54	0,23	0,56	0,48
Nuvem	-0,09	0,01	0,20	0,37	0,32	0,38
IA	0,00	0,16	0,49	0,31	0,51	0,49
IoT	-0,29	0,28	0,30	0,23	0,41	0,48
MA	0,01	0,08	0,28	0,55	0,13	0,35
Robótica	-0,22	0,37	0,52	0,29	0,30	0,51

Fonte: Os autores

Os resultados da tabela 03 sugerem um quadro intrigante para o caso brasileiro. A correlação é positiva e forte entre profissionais de nível superior e Big data e IA, mas fraca para Manufatura Aditiva e Robótica. Esse resultado pode estar mostrando uma característica da indústria brasileira, onde a incorporação de profissionais qualificados está mais focada em aspectos gerenciais pautados em rotinas pré-estabelecidas com tecnologias já disseminadas (computação em nuvem) do que contratações voltadas para geração de inovação e incorporação de altas tecnologias no processo produtivo.

Os resultados das regressões (**Tabela 04**) aprofundam as análises desenvolvidas até aqui ao mostrar que os coeficientes associados aos setores de média-alta e alta intensidade tecnológica são positivos e estatisticamente significativos para Big Data, MA e Robótica. Esses resultados confirmam que a intensidade tecnológica constitui um determinante estrutural da adoção de tecnologias digitais mais complexas, em linha com a hipótese neoschumpeteriana de difusão tecnológica assimétrica, segundo a qual o progresso técnico tende a se concentrar em segmentos específicos da estrutura produtiva em economias periféricas (Bell; Pavitt, 1993; Bell, 2009).

Tabela 04 – Evidências de heterogeneidade setorial por intensidade tecnológica na adoção de tecnologias digitais

Variável	Big data		Computação em Nuvem		IA	
	Coeficientes	Erro padrão	Coeficientes	Erro padrão	Coeficientes	Erro padrão
Intercepto	0,258	0,154	0,860*	0,137	0,386*	0,163
Média	-0,189	0,363	-0,258	0,383	-0,036	0,405
Grande	-0,001	0,161	-0,199	0,145	-0,214	0,184
Média-Alta	0,114*	0,038	0,036	0,041	0,127	0,074
Alta	0,091**	0,05	0,069	0,04	0,084	0,152
Sup	0,299	0,204	0,156	0,283	0,256	0,267
PoTec	-0,323	1,283	1,295	1,236	2,45	1,538
R²	0,243	-	0,074	-	0,462	-
Breusch-Pagan	6,06	0,416 [#]	6,82	0,338 [#]	6,56	0,363 [#]

(Continuação)

Variável	IoT		MA		Robótica	
	Coeficientes	Erro padrão	Coeficientes	Erro padrão	Coeficientes	Erro padrão
Intercepto	0,571*	0,185	0,305	0,175	0,343*	0,14
Média	-0,474	0,53	-0,117	0,52	-0,228	0,438
Grande	-0,164	0,179	-0,049	0,204	0,025	0,146
Média-Alta	0,046	0,1	0,256*	0,068	0,189*	0,058
Alta	-0,014	0,16	0,471*	0,074	0,122*	0,057
Sup	0,184	0,395	-0,581**	0,329	-0,488**	0,212
PoTec	2,583	2,655	-1,2	2,26	1,373	1,463
R²	0,308	-	0,553	-	0,506	-
Breusch-Pagan	7,53	0,274 [#]	3,43	0,753 [#]	4,43	0,618 [#]

Fonte: Os autores.

Notas: *(**) Significativo ao nível de confiança de 95% (90%), #p-valor. O fator de inflação da variância não identificou multicolineariedade.

Por sua vez, para Computação em Nuvem, IA e IoT, os coeficientes associados à intensidade tecnológica são, em geral, não significativos e os modelos apresentam menor poder explicativo. Esse padrão reforça a distinção, amplamente discutida na literatura, entre tecnologias digitais de uso mais geral e aquelas que demandam transformações profundas nos processos produtivos, sugerindo que apenas estas últimas tendem a reforçar de maneira intensa a heterogeneidade estrutural existente (Kinkel; Zink, 2017; Nguyen; Simkin; Canhoto, 2022).

Destaca-se que a variável relacionada à proporção de pessoas com nível superior foi negativa e significativa para Manufatura Aditiva e Robótica para as atividades industriais de maior intensidade tecnológica. Esse resultado coloca luz sobre aspectos relacionados à utilização da força de trabalho e seu efeito no avanço da tecnologia e na produtividade industrial. No caso destas atividades, os resultados sugerem que a incorporação de novos profissionais qualificados não relacionados diretamente à P&D limita a incorporação e o desenvolvimento de novas tecnologias. Ou seja, de um lado, a cultura corporativa e a rotina administrativa podem estar limitando iniciativas dos novos contratados em favor da adoção destas novas tecnologias. Por outro lado, os novos profissionais altamente qualificados podem estar apresentando deficiências de formação que os impossibilitem de dar respostas à altura das demandas do setor em que atuam.

De todo modo, os resultados empíricos confirmam a hipótese central do artigo: a digitalização da manufatura brasileira ocorre de forma estruturalmente assimétrica. As tecnologias digitais mais complexas e intensivas em capacidades produtivas e organizacionais tendem a se concentrar em setores tecnologicamente mais avançados, enquanto tecnologias de base digital e menor complexidade se difundem de forma mais homogênea (Cardoso; Brum, 2024). Esse padrão sugere que, na ausência de políticas deliberadas de fortalecimento das capacidades tecnológicas domésticas capazes de promover a integração física, a atual revolução digital tende mais a reproduzir do que a reduzir a heterogeneidade estrutural da indústria brasileira, em consonância com a interpretação neoschumpeteriana.

Pode-se inferir que por estarem na fronteira da competição internacional, os setores de maior intensidade tecnológica do Brasil são forçados a investir nas tecnologias que operem na faixa de maior produtividade, muito embora sem a necessidade de desenvolver e internalizar P&D. Big data, Manufatura Aditiva e Robótica são instrumentos voltados para aumento da produtividade sem necessariamente estarem envolvidos no processo inovativo. Ou seja, a utilização incremental das tecnologias digitais reflete a forma como o Brasil se insere nos mercados globais e as limitações relacionadas à forma como os recursos humanos são utilizados em cada setor.

Os resultados apresentados permitem afirmar que o objetivo do estudo foi plenamente alcançado, ao oferecer evidências sistemáticas sobre os determinantes setoriais da adoção de tecnologias digitais na indústria de transformação brasileira. A análise combinada de estatísticas descritivas, testes de heterogeneidade e modelos de regressão confirmou a hipótese 1, ao demonstrar que a adoção de tecnologias digitais mais complexas — como robótica, MA e análise de big data — é significativamente maior em setores de média-alta e alta intensidade tecnológica, refletindo a importância das capacidades tecnológicas previamente acumuladas.

Simultaneamente, os resultados corroboram a segunda hipótese, ao indicar que tecnologias digitais de uso mais geral e baseadas predominantemente em software, como a computação em nuvem e, em menor medida, a IoT, apresentam padrões de difusão mais homogêneos entre os setores industriais. Essas evidências reforçam a ideia de que a digitalização da manufatura brasileira ocorre de forma estruturalmente assimétrica e tende a reproduzir a heterogeneidade setorial preexistente.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo analisou a difusão setorial das tecnologias digitais na indústria de transformação brasileira à luz da abordagem neoschumpeteriana, avaliando em que medida a atual onda de digitalização é capaz de alterar, ou reproduzir, a heterogeneidade estrutural da economia brasileira. A análise combinou evidências descritivas da PINTEC com testes estatísticos e modelos econométricos em nível setorial, permitindo uma leitura integrada entre padrões empíricos, resultados formais e implicações políticas.

A análise descritiva indica que a digitalização da indústria brasileira é ampla, porém assimétrica. Tecnologias baseadas em software e gestão da informação, como computação em nuvem e Inteligência Artificial, apresentam elevada difusão setorial, configurando-se como infraestruturas digitais transversais. Esse resultado mostra que as atividades industriais menos expostas à competitividade não-preço, associada ao tamanho do mercado interno brasileiro contribuem para que a estratégia prioritária seja direcionada para a modernização do processo produtivo. Em contraste, tecnologias associadas à automação do processo produtivo físico, como robótica e Manufatura aditiva, permanecem concentradas em um número restrito de setores, majoritariamente de média-alta e alta intensidade tecnológica, cujo desempenho deve responder à dinâmica internacional do mercado.

À luz da dinâmica da inovação de Dosi (1982) e Utterback (1994), os resultados sugerem que políticas de inovação orientadas à transformação estrutural devem priorizar tecnologias digitais cujas trajetórias ainda não estejam estabilizadas. Robótica avançada, manufatura aditiva e aplicações industriais de big data e inteligência artificial configuram campos nos quais os designs dominantes permanecem em disputa, com elevados retornos dinâmicos associados ao aprendizado, à experimentação e à acumulação de capacidades tecnológicas. Em contraste, tecnologias já padronizadas e amplamente difundidas, como a computação em nuvem, embora fundamentais como infraestrutura, apresentam retornos marginais limitados em termos de mudança estrutural. Desse modo, tecnologias caracterizadas por maior heterogeneidade setorial emergem como candidatas prioritárias para políticas de inovação voltadas ao domínio da dinâmica da inovação.

As estatísticas compiladas corroboram esse diagnóstico. Os testes de heterogeneidade e as regressões indicam que a intensidade tecnológica setorial é um determinante estatisticamente significativo da adoção de tecnologias digitais mais complexas, como big data, robótica e manufatura aditiva, confirmando a primeira hipótese do estudo. Por outro lado, a ausência de heterogeneidade robusta para a computação em nuvem e, em menor grau, para a Internet das coisas, sustenta a segunda hipótese, segundo a qual tecnologias digitais de uso mais geral tendem a se difundir de forma mais homogênea, por exigirem menores investimentos irreversíveis e menor acúmulo prévio de capacidades tecnológicas.

A convergência entre as evidências descritivas e os resultados estatísticos reforça a interpretação de que a atual onda de digitalização tende a reproduzir padrões históricos de heterogeneidade estrutural. Em linha com a literatura neoschumpeteriana, os resultados indicam que a incorporação do progresso técnico permanece condicionada pelas capacidades produtivas, pela estrutura de mercado, organizacionais e institucionais previamente acumuladas. Além disso, os resultados mostram que a estratégia de modernização industrial, apesar de apresentar avanços, ainda se encontra limitada nas atividades que geralmente estão mais expostas à concorrência internacional, qual seja as atividades de maior intensidade tecnológica.

Por serem atividades que precisam operar em padrões de alta produtividade e competição não-preço os investimentos atrelados à Robótica e Manufatura aditiva já trazem consigo tecnologias pré-requisitos, como big data e computação em nuvem. Pode-se inferir que a forma de inserção da indústria associada ao grau de intensidade tecnológica contribui sobremaneira para a adoção de determinados tipos de tecnologias digitais.

Do ponto de vista das implicações em termos de política industrial, os resultados sugerem que estratégias centradas apenas na ampliação do acesso a tecnologias digitais genéricas são insuficientes para promover transformação estrutural positiva que garanta competitividade e aumento da produtividade de forma sustentada. A difusão de infraestruturas digitais constitui condição necessária, mas não suficiente, para o avanço da automação produtiva e do *upgrading* tecnológico. Políticas públicas eficazes devem combinar incentivos fiscais e financiamento de longo prazo voltados para a adoção de tecnologias digitais avançadas com ações voltadas ao fortalecimento das capacidades produtivas e organizacionais das firmas, incluindo integração física, formação de capital humano, apoio ao aprendizado tecnológico e mitigação dos riscos associados a investimentos intensivos em capital.

Nesse contexto, a análise permite uma leitura crítica da Nova Indústria Brasil (NIB). Embora represente um avanço ao reconhecer a heterogeneidade estrutural e recolocar a política industrial no centro da estratégia de desenvolvimento, seu desenho institucional apresenta limitações. A literatura sobre digitalização industrial enfatiza o papel do direcionamento tecnológico e da discricionariedade na alocação

de instrumentos para enfrentar assimetrias de capacidades e promover o *catching up* tecnológico. Contudo, a NIB permanece ancorada em missões amplas e recortes genéricos, com pouca diferenciação segundo tecnologias digitais específicas, o que tende a favorecer soluções transversais. Os resultados mostram que essa estratégia tende a reproduzir padrões imitativos e à aprofundar a heterogeneidade setorial, ao favorecer tecnologias baseadas em software em detrimento de tecnologias que exibem maior dependência de integração física.

Por fim, o artigo oferece evidências empíricas sistemáticas sobre os determinantes setoriais da adoção de tecnologias digitais na indústria brasileira, indicando que seus efeitos dependem menos da disponibilidade tecnológica e mais das capacidades estruturais que condicionam sua apropriação. Pesquisas futuras podem aprofundar essa agenda por meio de dados microeconômicos (nível da firma) e análises longitudinais, examinando os impactos da digitalização sobre produtividade, emprego e estrutura ocupacional, bem como o papel das políticas públicas na redução da heterogeneidade estrutural e na promoção de trajetórias sustentadas de transformação produtiva.

Referências

ACEMOGLU, D.; RESTREPO, P. Robots and jobs: Evidence from US labor markets. **Journal of Political Economy**, v. 128, n. 6, p. 2188–2244, 2020.

AGHION, P.; BOULANGER, J.; COHEN, E. Rethinking industrial policy. **Bruegel Policy Brief**, n. 4, 2015.

ALEMANHA. **High-Tech Strategy 2025**. Berlin: Federal Ministry of Education and Research (BMBF), 2020.

ANDREWS, D.; CRISCUOLO, C.; GAL, P. The global productivity slowdown, technology divergence and public policy. **OECD Productivity Working Papers**, n. 5, 2016.

ARAÚJO, B. C.; CAVALCANTE, L. R.; ALVES, P. **Variáveis proxy para os gastos empresariais em inovação**. Radar, n. 104, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), dez. 2009.

ARMSTRONG, M. *et al.* Cloud computing: Business perspectives and research directions. **Journal of Cloud Computing**, v. 5, n. 1, p. 1–15, 2016.

BALDWIN, R. **The globotics upheaval: Globalization, robotics, and the future of work**. Oxford: Oxford University Press, 2019.

BELL, M. Innovation capabilities and directions of development. **STEPI Working Paper**, n. 33, 2009.

BELL, M.; PAVITT, K. Technological accumulation and industrial growth. **Industrial and Corporate Change**, v. 2, n. 2, p. 157–210, 1993.

BLOCK, F.; KELLER, M. R. *State of innovation: The U.S. government's role in technology development*. Boulder: **Paradigm Publishers**, 2011.

BNDES. **Indústria 4.0 e a digitalização da economia brasileira**. Rio de Janeiro: BNDES, 2021.

BNDES. **Transformação digital e produtividade industrial**. Rio de Janeiro: BNDES, 2023.

BRASIL. **Nova Indústria Brasil: política industrial, inovação e sustentabilidade para o desenvolvimento nacional**. Brasília, DF: Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços,

2024.

BRESCHI, S.; MALERBA, F. The geography of innovation and economic clustering: some introductory notes. **Industrial and corporate change**, v. 10, n. 4, p. 817-833, 2001.

BRYNJOLFSSON, E.; HITT, L.; KIM, H. Strength in numbers: How does data-driven decision-making affect firm performance? **Management Science**, v. 57, n. 6, p. 113–129, 2011.

BRYNJOLFSSON, E.; MCAFEE, A. **The second machine age**. New York: Norton, 2014.

BRYNJOLFSSON, E.; ROCK, D.; SYVERSON, C. The productivity J-curve: How intangibles complement general purpose technologies. **American Economic Journal: Macroeconomics**, v. 13, n. 1, p. 333–372, 2021

CHINA. **Made in China 2025**. Beijing: State Council of the People's Republic of China, 2015.

CIMOLI, M.; DOSI, G.; STIGLITZ, J. (org.). **Industrial policy and development**. Oxford: Oxford University Press, 2009.

CIRERA, X.; MALONEY, W. **The innovation paradox**. Washington, DC: World Bank, 2017.

COCKBURN, I.; HENDERSON, R.; STERN, S. The impact of artificial intelligence on innovation. In: AGHION, P. *et al.* (org.). **The economics of artificial intelligence**. Chicago: University of Chicago Press, 2018.

COHEN, Wesley M. *et al.* Absorptive capacity: A new perspective on learning and innovation. **Administrative science quarterly**, v. 35, n. 1, p. 128-152, 1990.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (CNI). **Desafios para a Indústria 4.0 no Brasil**. Brasília: CNI, 2016.

COREIA DO SUL. **National Strategy for Artificial Intelligence**. Seoul: Government of the Republic of Korea, 2021.

COUTINHO, L.; FERRAZ, J. C. (org.). **Estudo da competitividade da indústria brasileira**. Campinas: Papirus, 1994.

DE NEGRI, F.; TURCHI, L. (org.). **Inovação, produtividade e crescimento: evidências para o Brasil**. Brasília: IPEA, 2018.

DOSI, G. Technological paradigms and technological trajectories: A suggested interpretation of the determinants and directions of technical change. **Research Policy**, v. 11, n. 3, p. 147–162, 1982.

ESTADOS UNIDOS. **A National Strategic Plan for Advanced Manufacturing**. Washington, DC: Executive Office of the President, 2011.

ESTADOS UNIDOS. **CHIPS and Science Act of 2022**. Washington, DC: U.S. Congress, 2022.

Eurostat. **ICT usage and e-commerce in enterprises – usage of information and communication technologies by enterprises**.

FORD, S.; DESPEISSE, M. Additive manufacturing and sustainability. **Journal of Cleaner Production**, v. 137, p. 1573–1587, 2016.

FREEMAN, C.; PEREZ, C. Structural crises of adjustment. In: DOSI, G. et al. (org.). **Technical change and economic theory**. London: Pinter, 1988.

FREEMAN, C.; SOETE, L. **The economics of industrial innovation**. 3. ed. London: Pinter, 1997.

FURTADO, C. **Development and underdevelopment**. Univ of California Press, 1964.

GRAETZ, G.; MICHAELS, G. Robots at work. **Review of Economics and Statistics**, v. 100, n. 5, p. 753–768, 2018.

HALL, Bronwyn H.; LERNER, Josh. The financing of R&D and innovation. In: **Handbook of the Economics of Innovation**. North-Holland, 2010. p. 609-639.

HELPMAN, E. (org.). **General purpose technologies and economic growth**. Cambridge, MA: MIT Press, 1998.

HOLMSTRÖM, J. *et al.* The direct digital manufacturing paradigm. **Computers in Industry**, v. 82, p. 34–44, 2016.

IBGE. **Pesquisa de Inovação – PINTEC 2017: resultados principais**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023.

IBGE. **Pesquisa de Inovação Semestral – PINTEC 2022**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023.

IBGE. **Pesquisa de Inovação Semestral: indicadores temáticos – tecnologias digitais avançadas**. Rio de Janeiro: IBGE, 2024.

IBGE. **Pesquisa de Inovação Semestral – PINTEC 2024**. Rio de Janeiro: IBGE, 2025.

IBGE. **Pesquisa de Inovação Semestral: indicadores temáticos – tecnologias digitais avançadas, teletrabalho e cibersegurança 2024**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2024.

IEDI. **Carta IEDI – Diffusion of digital technologies and Industry 4.0 in Brazil**. IEDI, 2025.

IEDI. Indústria 4.0: desafios e oportunidades para o Brasil. Carta IEDI, n. 797, 2017. Disponível em: https://www.iedi.org.br/cartas/carta_iedi_n_797.html. Acesso em: 17 mar. 2026.

INSTITUTO EUVALDO LODI (IEL). **Síntese dos resultados: tecnologias disruptivas e indústria – situação atual e avaliação prospectiva**. Brasília: IEL/NC, 2018.

INTERNATIONAL FEDERATION OF ROBOTICS (IFR). **World Robotics – Industrial Robots 2023**. Frankfurt: IFR, 2023.

IPEA. **Digitalização, produtividade e política industrial**. Brasília: IPEA, 2022.

IPEA. **Indústria 4.0 e transformação produtiva no Brasil**. Brasília: IPEA, 2021.

KALDOR, N. Causes of the Slow Rate of Economic Growth in the UK. **Economic Growth in Theory e Practice: A Kaldorian Perspective**, 1966.

KALDOR, N. The role of increasing returns, technical progress and cumulative causation in the theory of international trade and economic growth. **Economie appliquée**, 34(6), 593-617, 1981.

- KINKEL, S.; ZINK, K. Industry 4.0 and the changing role of human factors. **Ergonomics**, v. 60, n. 4, p. 488–497, 2017.
- KUBOTA, L. C.; DE NEGRI, F. **Transformação digital e produtividade na indústria brasileira**. Brasília: IPEA, 2021.
- KUPFER, David; FERRAZ, João Carlos; TORRACCA, Júlia. **A comparative analysis on digitalization in manufacturing industries in selected developing countries: firm-level data on Industry 4.0**. Vienna: United Nations Industrial Development Organization (UNIDO), Inclusive and Sustainable Industrial Development Working Paper Series, n. 16, 2019.
- LALL, S. Technological capabilities and industrialization. **World Development**, v. 20, n. 2, p. 165–186, 1992.
- LEE, K.; MALERBA, F. Catch-up cycles and changes in industrial leadership. **Research Policy**, v. 46, n. 2, p. 338–351, 2017.
- LEWIS, W. A. **Economic development with unlimited supplies of labor**. The Manchester School of Economic and Social Studies 22: 139-191, 1954.
- LOW, C.; CHEN, Y.; WU, M. Understanding the determinants of cloud computing adoption. **Industrial Management & Data Systems**, v. 111, n. 7, p. 1006–1023, 2011.
- MALERBA, F. Sectoral systems of innovation and production. **Research Policy**, v. 31, n. 2, p. 247–264, 2002
- MARSTON, S. *et al.* Cloud computing - The business perspective. **Decision Support Systems**, v. 51, n. 1, p. 176–189, 2011.
- MAZZUCATO, Mariana. The entrepreneurial state. **Soundings**, v. 49, n. 49, p. 131-142, 2011.
- MCMILLAN, M. S., & RODRIK, D. **Globalization, structural change and productivity growth** (No. w17143). National Bureau of Economic Research, 2011.
- MILGROM, Paul; ROBERTS, John. Complementarities and fit strategy, structure, and organizational change in manufacturing. *Journal of accounting and economics*, v. 19, n. 2-3, p. 179-208, 1995.
- NGUYEN, B.; SIMKIN, L.; CANHOTO, A. The dark side of digital personalization. **Industrial Marketing Management**, v. 103, p. 1–14, 2022.
- ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT (OECD). **ISIC Rev. 3 Technology intensity definition: classification of manufacturing industries into categories based on R&D intensities**. Paris: OECD, 2011.
- PEREZ, C. **Technological revolutions and financial capital**. Cheltenham: Edward Elgar, 2002.
- PEREZ, C.; SOETE, L. Catching up in technology. In: DOSI, G. *et al.* (org.). **Technical change and economic theory**. London: Pinter, 1988.
- PREBISCH, R.; CABAÑAS, G. M. El desarrollo económico de la América Latina y algunos de sus principales problemas. **El trimestre económico**, 16(63 (3), 347-431, 1949.

REIS, F. B. **Indústria 4.0 em manufaturas no Brasil: análise dos benefícios e barreiras de adoção**. Dissertação (Mestrado em administração) – Universidade de São Paulo, 2021.

SCHWAB, K. **The fourth industrial revolution**. Geneva: World Economic Forum, 2016.

STRADIOTO, L.; FRAZZON, E. M. Digital transformation in Brazilian industry: bridging theory and practice. **Production**, v. 33, p. e20220076, 2023.

TEECE, David J. Profiting from technological innovation: Implications for integration, collaboration, licensing and public policy. *Research policy*, v. 15, n. 6, p. 285-305, 1986.

URRACA-RUIZ, A. *et al.* Factors determining the path of digital technologies adoption of Brazilian industrial firms. **Revista Brasileira de Inovação**, v. 22, p. e023014, 2023.

UTTERBACK, J. M. Mastering the dynamics of innovation. Boston: **Harvard Business School** Press, 1994.