



VIII ENEI
Encontro Nacional de
Economia Industrial e
Inovação

20 a 23 de Maio de 2024

**POLÍTICA INDUSTRIAL E
ECONOMIA DO CONHECIMENTO:
NOVAS ESTRATÉGIAS DE
DESENVOLVIMENTO PARA O BRASIL**



Determinantes da Adoção de Inteligência Artificial por Empresas Brasileiras

Maurício Benedeti Rosa¹
Luis Claudio Kubota²

Resumo: A Inteligência Artificial (IA) tem o potencial de aumentar significativamente a produtividade econômica de longo prazo. Com a automação de processos, o aprimoramento da tomada de decisões e a capacidade de analisar grandes conjuntos de dados em tempo real, a IA impulsiona a eficiência operacional e a inovação das empresas. As promessas associadas à IA têm se avolumado, mas pesquisas indicam que a sua adoção por empresas ainda é incipiente, tal que ela pode ser melhor compreendida quando analisada no contexto mais abrangente das tecnologias 4.0. Este trabalho busca contribuir com a caracterização das principais aplicações de IA conforme proposta da pesquisa TIC Empresas 2021, e com a avaliação dos determinantes da adoção de IA por empresas brasileiras. Os resultados que emergem da análise apontam que a adoção de tecnologias como Internet das Coisas, Big Data e computação em nuvem, além de características como setor de atuação e porte, tem grande influência sobre a adoção de IA em empresas brasileiras. Isso reforça a necessidade de se conceber a transformação digital de maneira integrada, harmonizada e abrangente, com políticas públicas capazes de endereçar tais características.

Palavras-chave: Inteligência artificial; tecnologias 4.0; transformação digital

Código JEL: O14, L86, M15

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

Determinants of Artificial Intelligence Adoption by Brazilian Companies

Abstract: Artificial Intelligence (AI) has the potential to significantly boost long-term economic productivity. Through the automation of processes, enhancement of decision-making, and the ability to analyze large datasets in real-time, AI drives operational efficiency and innovation within businesses. The promises associated with AI have been mounting, yet research indicates that its adoption by companies is still nascent, such that it can be better understood when analyzed in the broader context of 4.0 technologies. This study aims to contribute to the characterization of the main AI applications as proposed by the ICT Enterprises 2021 survey, and to the assessment of the determinants of AI adoption by Brazilian companies. The results emerging from the analysis indicate that the adoption of technologies such as the Internet of Things, Big Data, and cloud computing, in addition to characteristics like industry sector and size, have a strong influence on AI adoption in Brazilian companies. This underscores the need for conceiving digital transformation in an integrated and comprehensive manner, with public policies capable of addressing such characteristics.

Keywords: Artificial intelligence; 4.0 technologies; digital transformation

¹ Engenheiro de Controle e Automação, Mestre em Economia, Doutorando em Economia. Pesquisador do Subprograma de Pesquisa para o Desenvolvimento Nacional (PNPD) na Diset/Ipea. E-mail: mb.rosa@unesp.br.

² Economista, Especialista em Economia da Saúde, Mestre e Doutor em Administração. Pesquisador e coordenador na Diset/Ipea. E-mail: luis.kubota@ipea.gov.br.

1. Introdução

A inteligência artificial ganha cada vez mais notoriedade após o lançamento, no final de 2022, do Chat Generative Pre-Trained Transformer – ChatGPT. Possivelmente a tecnologia mais proeminente no contexto da quarta revolução industrial, ela tem gerado promessas de ganhos de produtividade, melhorias no bem-estar e até mesmo a possibilidade de se tornar uma importante ferramenta no enfrentamento de grandes desafios, por exemplo o aquecimento global. Embora ainda persistam questões associadas à confiabilidade, privacidade, segurança, entre outros, a tecnologia tem mostrado uma crescente popularidade, a ponto de o Observatório de Políticas de IA da OCDE já documentar mais de 800 iniciativas políticas em 69 jurisdições (Caira e Perset, 2023).

A IA está relacionada a uma série de outras tecnologias emergentes, como robótica, veículos autônomos, realidade virtual ou aumentada, indústria 4.0, entre outras. Na manufatura, em particular, a IA tem o potencial de transformar todos os processos, desde o desenho, até a fabricação e montagem, treinamento de funcionários, manutenção preditiva e preventiva, gerenciamento de estoque, distribuição e vendas de produtos (Ezell e Lazar, 2022). Entre as técnicas utilizadas, o *deep learning* tornou-se popular com o aumento da capacidade computacional e a maior disponibilidade de dados, sendo aplicado, por exemplo, na classificação de imagens. A indústria também está se movendo em direção à computação em nuvem, à utilização de Big Data e à análise de dados. Com relação aos métodos de aprendizado de máquina, as redes neurais tem despertado crescente interesse (Hansen e Bøgh, 2021).

No âmbito da manufatura global, a IA se destaca como um importante impulsionador do desenvolvimento e passará a ter cada vez mais relevância no futuro. Neste intenso processo de transformação, as principais economias do mundo estão emitindo sucessivas estratégias para desenvolver vigorosamente a IA em seus territórios. De forma complementar aos arcabouços em nível nacional, destaca-se também o grau de sofisticação quando da aplicação da tecnologia dentro das empresas, envolvendo não apenas mudanças nas práticas de produção, mas também modificações nos estilos de gestão e mentalidades, as quais representam desafios significativos para as companhias (Wang, Sun e Xu, 2023).

A integração das novas tecnologias – e.g., inteligência artificial, aos atuais sistemas de trabalho ainda está em aberto (Kolberg, Knobloch e Zühlke, 2017), de forma que as fronteiras desse fenômeno ainda são bastante difusas (Lima e Gomes, 2020). A fase inicial deste novo ciclo permite a coexistência das tecnologias baseadas na era industrial com tecnologias de ponta. A falta de uma transformação tecnológica claramente definida torna extremamente importante que países em desenvolvimento se preparem por meio de políticas públicas que apoiem a inovação (Arbix *et al.*, 2017). No Brasil, há preocupações quanto ao atraso na inserção do país na quarta revolução industrial, as quais incluem a falta de iniciativas governamentais, a baixa prioridade para inovação em termos de políticas públicas, entre outros.

Conforme a crescente relevância que tecnologias como a inteligência artificial têm assumido para permitir a elevação dos níveis de produtividade e a inserção de países em desenvolvimento no cenário internacional, é de extrema importância entender o grau de maturidade brasileira quanto à adoção da IA por suas empresas, bem como caracterizar as diferentes técnicas abrangidas no guarda chuva dessa tecnologia. Para tanto, este trabalho detalha as principais aplicações de IA em empresas e utiliza-se de modelagem não paramétrica – árvores de decisão, com dados da pesquisa TIC Empresas 2021, para estimar os principais determinantes da adoção de IA no Brasil.

O artigo está organizado em quatro seções, além desta introdução. A Seção 2 apresenta uma revisão da literatura sobre inteligência artificial no contexto de políticas públicas e níveis de adoção em empresas. A Seção 3 apresenta a metodologia não paramétrica de árvores de decisão, a Seção 4 apresenta os resultados e a discussão e, por fim, as considerações finais são apresentadas na Seção 5.

2. Revisão de Literatura

2.1 IA nas firmas

Segundo a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), um sistema de IA pode ser definido como baseado em máquina e capaz de influenciar o ambiente ao produzir uma saída

(predições, recomendações ou decisões) para um dado conjunto de objetivos. Ele utiliza dados de máquina e/ou humanos e entradas para: (i) perceber ambientes reais e/ou virtuais; (ii) abstrair estas percepções em modelos por meio da análise automatizada, ou manualmente; e (iii) utilizar modelo de inferência para formular opções para saídas. Sistemas de IA são desenhados para operar com variáveis níveis de autonomia e tem como exemplos os modelos de aprendizado de máquina, de aprendizado profundo, de processamento de linguagem natural e visão computadorizada (Ezell e Lazar, 2022).

A aplicação de IA é realidade em diversos setores, desde áreas como ciência da computação e engenharia, até manufatura industrial, educação e medicina. A literatura internacional tem inúmeros exemplos de estudos que buscaram avaliar os determinantes de adoção de IA em diferentes esferas de atuação empresarial.

No setor de saúde, por exemplo, segundo (Khanijahani *et al.*, 2022), os determinantes comuns da adoção e aceitação de IA por profissionais e pacientes mostraram-se relacionados a fatores psicossociais, como facilidade de uso ou utilidade percebida, além de desempenho ou expectativa de esforço. Com relação aos fatores estruturais, destaque para atributos como tamanho da organização, fluxo de trabalho, treinamento e segurança, os quais desempenharam papéis significativos na adoção de tecnologias de IA.

No âmbito de organizações públicas, tendo a Suíça como referência, (Neumann, Guirguis e Steiner, 2024) sugeriram que a importância dos determinantes da adoção de IA de natureza tecnológica e organizacional variam conforme a maturidade da organização no processo de adoção da tecnologia. Segundo os autores, organizações iniciando a adoção de IA dependem de equipes motivadas e parceiros externos para implementar projetos, iniciando frequentemente com aplicações menos complexas como agentes conversacionais. Por sua vez, organizações com maturidade intermediária tentam a implementação interna com mais frequência, necessitando de apoio substancial de gestão estratégica para avançar para além da fase exploratória.

Na cadeia de suprimentos de alimentos, (Dora *et al.*, 2022) avaliaram fatores críticos de sucesso para a adoção de inteligência artificial no contexto de países em desenvolvimento. Os resultados indicaram como principais determinantes a prontidão tecnológica das empresas, bem como questões de segurança, privacidade, satisfação do cliente, benefícios percebidos, volatilidade da demanda, conformidade regulatória, pressão dos concorrentes, entre outros.

Vários trabalhos debruçaram-se também sobre a avaliação dos determinantes da implementação de IA em MPMEs. No contexto da Arábia Saudita, (Baabdullah *et al.*, 2021) destacaram o maior potencial de utilização se tanto o conhecimento adequado quanto as informações sobre características e benefícios das aplicações de IA tiverem sido previamente capturados, além da haver disponibilidade de infraestrutura técnica - e.g., os recursos técnicos necessários e as instalações. De forma complementar, (Bhalerao *et al.*, 2022), a partir de revisão de literatura, identificaram o porte empresarial, qualificação da mão de obra, qualidade dos dados disponíveis, entre outros, como barreiras substanciais para a adoção de IA. No que tange à relação com outras tecnologias, (Hansen e Bøgh, 2021, p. 369) sustentam que:

The AI topic was shown to have been used at both cloud solutions and more close to production. However, the lack of IT knowledge in SMEs can deter them from adopting machine learning projects. SMEs might not know where to start or even know that the technology exists and can be used to their benefits [...]. The machine learning methods have also become more accessible where commercial cloud solutions already have built-in easy-to-use machine learning tools [...]. Furthermore, if an SME still lacks digitisation, the focus should be there instead.

A expectativa sobre os benefícios passíveis de surgimento com as novas aplicações de inteligência artificial é cada vez maior, mas estudos empíricos capazes de detalhar a utilização da tecnologia por empresas brasileiras ainda são poucos. De maneira mais abrangente, em termos de tecnologias 4.0, pesquisas da CNI (CNI, 2016, 2022) ajudaram a traçar a evolução em território nacional, indicando o baixo conhecimento, especialmente entre as pequenas empresas, como um obstáculo substancial à utilização, além dos altos custos de implementação como a principal barreira interna e a falta de trabalhadores qualificados como o principal desafio externo. Os resultados gerais também confirmaram a baixa maturidade no processo de digitalização brasileiro.

A pesquisa de inovação (PINTEC Semestral) realizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e

Estatística (IBGE) examinou a adoção de tecnologias avançadas em uma amostra representativa de 8.134 indústrias extrativas e de transformação com 100 ou mais funcionários. Os percentuais de adoção das tecnologias foram os seguintes: análise de Big Data (23,4%), computação em nuvem (73,6%), inteligência artificial (16,9%), internet das coisas (48,6%), manufatura aditiva (19,2%) e robótica (27,7%).³ Entre o conjunto de tecnologias, destaque para o grau ainda baixo de utilização de IA.

No contexto específico da inteligência artificial, pesquisa feita pela IBM (IBM, 2022) apontou que, entre março e abril de 2022, 41% das empresas no Brasil já implementavam ativamente IA em seus negócios,⁴ – no âmbito mundial esse valor era de 35%. Já pesquisa realizada pela Deloitte em 2023 apontou que 70% das empresas consultadas iriam investir em IA, sendo que, no momento da pesquisa, 20% afirmaram já utilizar recursos de IA no cotidiano.⁵

Kubota e Lins (2022) utilizaram a pesquisa TIC Empresas para comparar o Brasil e a Europa em relação à adoção de tecnologias. O Brasil apresentou 13% de suas empresas utilizando algum tipo de IA, um nível mais elevado do que a maioria dos países europeus - a Dinamarca é líder no continente europeu, com 24% de suas empresas tendo declarado o uso de algum tipo de tecnologia de IA.

Uma análise comparativa da adoção de IA em 10 países indicou fatos estilizados⁶ que incluíram a adoção mais pronunciada nas firmas de maior porte, nas mais novas, e nos setores de TICs e serviços profissionais. Além disso, habilidades em TICs e treinamento, capacidades digitais e infraestrutura digital foram significativamente relacionados com o uso de IA, e também houve indícios de viés de seleção de firmas mais digitais e competitivas – logo, mais produtivas – para o uso de IA (Calvino e Fontanelli, 2022).⁷

No que concerne aos desafios para adoção de IA por empresas, estudos da OCDE ajudaram a avaliar o cenário atual. Segundo (Ezell e Lazar, 2022), entre os fatores estão a falta de prontidão para a digitalização (ex: falta de informação digitalizada), preocupações com os custos da IA, incerteza quanto ao retorno do investimento e preocupação com acesso a mão de obra qualificada. (OCDE, 2022) apontou desafios semelhantes, além de incluir obstáculos adicionais. Foram citadas a falta de habilidades de IA, incertezas quanto ao retorno do investimento, dificuldades na explicação de predições ou prescrições da IA (“caixa preta”), necessidade de mudança em modelos de negócios, complexidade no ambiente regulatório e ético, entre outros.

2.2 Maturidade digital das firmas

Um modelo capaz de auxiliar no entendimento da adoção de tecnologias digitais foi proposto por (Schuh *et al.* 2020) e detalha seis estágios associados a processos de digitalização, conforme Quadro 1.

Nessa abordagem, os primeiros dois estágios estão focados na digitalização fundamental, envolvendo a conversão de dados para o formato digital, a integração de sistemas empresariais diversos, e, em contextos industriais, a conexão dos principais equipamentos de produção ao sistema de gestão integrado. No terceiro estágio, as empresas alcançam a capacidade de monitoramento em tempo real das operações, abrangendo desde a produção até a logística e a interação dos clientes com produtos e serviços digitais. O quarto estágio expande essa capacidade com o emprego de tecnologias avançadas para compreender as causas dos eventos, como o uso de IA para identificar por que um componente falhou – Big Data é comumente utilizada neste estágio. No quinto estágio, as organizações antecipam eventos futuros, tal como com a previsão de defeitos em máquinas, e preparam-se proativamente para desafios iminentes. Por fim, o sexto estágio representa o ápice dessa evolução, onde máquinas autônomas não apenas detectam mas também corrigem seus próprios erros, demonstrando um nível de independência e inteligência avançada (Schuh *et al.* 2020).

³ Ver <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/37973-84-9-das-industrias-de-medio-e-grande-porte-utilizaram-tecnologia-digital-avancada>. Acesso em 08 fev. 2024.

⁴ Ver <https://www.ibm.com/blogs/ibm-comunica/estudo-ibm-41-das-empresas-no-brasil-ja-implementaram-ativamente-inteligencia-artificial-em-seus-negocios/>. Acesso em 08 fev. 2024.

⁵ Ver <https://invest.mcti.gov.br/blog/em-2023-7-em-cada-10-empresas-brasileiras-investirao-em-inteligencia-artificial/>. Acesso em 08 fev. 2024.

⁶ Bélgica, Dinamarca, França, Alemanha, Irlanda, Israel, Itália, Japão, Coreia do Sul e Suíça.

⁷ Se essa tendência permanecer, há o risco de aumentar a distância entre as firmas mais e menos produtivas.

Quadro 1 - Estágios de desenvolvimento da Indústria 4.0

Indústria 4.0	6.Adaptabilidade	“Auto otimização”: como uma resposta autônoma pode ser atingida?
	5.Capacidade preditiva	“Estar preparado”: O que irá acontecer?
	4.Transparência	“Entendimento”: Por que está acontecendo?
	3.Visibilidade	“Visualizando”: O que está acontecendo?
Digitalização	2.Conectividade	
	1.Digitalização ¹	

Fonte: adaptado e traduzido livremente pelos autores de Schuh *et al.* (2020).

Nota 1: *Computarization* no original.

Uma proposta com algumas semelhanças estruturais foi feita por Lu e Weng (2018), os quais construíram uma arquitetura de manufatura composta por quatro camadas: sensorial, de integração, inteligente e de resposta. Enquanto a camada sensorial é responsável pelo monitoramento de dados físicos e ambientais localizados, a camada de integração reúne os dados coletados pela camada anterior e os encaminha para um centro de gestão de dados. Além delas, a camada inteligente analisa as informações integradas e faz previsões utilizando análises de dados e algoritmos. Por fim, a camada de resposta desenvolve diferentes aplicações e serviços com base nas três camadas anteriores.

3. Metodologia

As subseções a seguir detalham a base de dados utilizada e o procedimento de modelagem não paramétrica de árvores de decisão.

3.1 Base de Dados

Para avaliação quanto aos determinantes da adoção de IA⁸ por empresas brasileiras, o estudo empírico foi desenvolvido a partir dos microdados da pesquisa TIC Empresas 2021. Da amostra planejada de 7000 empresas, foram concluídas 4064 entrevistas entre os meses de agosto de 2021 e abril de 2022 (Comitê Gestor da Internet no Brasil, 2022).⁹ Conforme explicação mais detalhada a ser feita na seção de resultados, apenas uma parcela das entrevistas concluídas será utilizada na estimação do modelo, por conta de limitações referentes às perguntas sobre a utilização de novas tecnologias pelas empresas. O Quadro 2 apresenta detalhes quanto às variáveis utilizadas no estudo:

Quadro 2 - Descrição das variáveis utilizadas

Variável	Descrição
Região	Corresponde à divisão regional do Brasil, segundo critérios do IBGE, nas macrorregiões: (1) Norte; (2) Nordeste; (3) Sudeste; (4) Sul e (5) Centro-Oeste
Porte ¹⁰	Corresponde à divisão por pequenas, médias e grandes empresas segundo o número de pessoas ocupadas:

⁸ A TIC Empresas não adota uma definição formal de IA. Os entrevistados são orientados sobre o que é considerado IA ou não a partir de suas aplicações, conforme questões H9 apresentadas no Quadro 2.

⁹ Para a construção da base de dados completa da pesquisa TIC Empresas 2021, as empresas foram contatadas por meio da técnica de entrevista telefônica assistida por computador. Em todas as empresas pesquisadas, buscou-se entrevistar o responsável pela área de informática, tecnologia da informação, gerenciamento da rede de computadores ou área equivalente. Nas empresas que declararam no momento da entrevista ter 250 pessoas ocupadas ou mais, a estratégia foi entrevistar um segundo profissional, preferencialmente o gestor da área contábil ou financeira. A cada empresa da amostra foi associado um peso amostral básico, obtido pela razão entre a quantidade de empresas existentes no estrato e o tamanho da amostra no estrato final correspondente. Houve ainda correção de não resposta para os casos em que não se obteve as respostas de todos os selecionados.

¹⁰ Destaca-se que, desde a edição 2017, a informação divulgada tem como base aquela disponível no cadastro e não a

	(2) 10 a 49 pessoas ocupadas; (3) de 50 a 249 pessoas ocupadas e (4) 250 pessoas ocupadas ou mais
Mercados de atuação – CNAE 2.0	Corresponde à classificação das empresas nas seções mostradas como C, F, G, H, I, J, L+M+N, R+S: (1) Indústria de Transformação; (2) Construção; (3) Comércio; reparação de veículos automotores, objetos pessoais e domésticos; (4) Transporte, Armazenagem e Correio; (5) Alojamento e Alimentação; (6) Informação e Comunicação; (7) Atividades imobiliárias + Atividades profissionais, científicas e técnicas + Atividades administrativas e serviços complementares; (8) Artes, cultura, esportes e recreação + Outras atividades de serviços
B3_3	Nos últimos 12 meses, a empresa utilizou conexão via fibra ótica?
A5	Nos últimos 12 meses, a empresa utilizou aplicativo Enterprise Resource Planning?
B18_1_4	Nos últimos 12 meses, a empresa pagou por capacidade de processamento na nuvem?
H1	Nos últimos 12 meses, a empresa fez análises de Big Data?
H3A	Nos últimos 12 meses, a empresa utilizou robôs industriais?
H3B	Nos últimos 12 meses, a empresa utilizou robôs de serviços?
H5	Nos últimos 12 meses, a empresa utilizou impressão em 3D?
H7	Sua empresa usa dispositivos de IoT?
D11	A sua empresa possui uma política para a segurança digital?
H9_A	Esta empresa utiliza tecnologias de Inteligência Artificial para: Mineração de texto e análise da linguagem escrita?
H9_B	Esta empresa utiliza tecnologias de Inteligência Artificial para: Reconhecimento de fala, que converte a linguagem falada em formato legível para máquinas?
H9_C	Esta empresa utiliza tecnologias de Inteligência Artificial para: Geração de linguagem natural (GLN) para linguagem escrita ou falada?
H9_D	Esta empresa utiliza tecnologias de Inteligência Artificial para: Reconhecimento e processamento de imagens, que identificam objetos ou pessoas?
H9_E	Esta empresa utiliza tecnologias de Inteligência Artificial para: <i>Machine learning</i> , como <i>deep learning</i> , para predição e análise de dados?
H9_F	Esta empresa utiliza tecnologias de Inteligência Artificial para: Automação de processos de fluxos de trabalho?
H9_G	Esta empresa utiliza tecnologias de Inteligência Artificial para: Movimentação física de máquinas por meio de decisões autônomas como robôs, veículos e drones autônomos?
H9_AGREG	Assume valor unitário se ao menos uma das aplicações de IA foi adotada pela empresa.

Fonte: Elaboração própria a partir de (Comitê Gestor da Internet no Brasil, 2022).

Para todas as variáveis do Quadro 2 (com exceção de região, porte, CNAE e H9_AGREG), as possibilidades de resposta incluíram: 0 = "Não"; 1 = "Sim"; 97 = "Não sabe"; 98 = "Não respondeu" e 99 = "Não se aplica". As respostas 97, 98 e 99 foram substituídas por 0 assumindo que o desconhecimento e a não resposta implicam na não utilização.

3.2. Modelagem não paramétrica

No presente trabalho, utiliza-se um modelo não paramétrico de árvore de decisão. Proposto inicialmente por (Breiman *et al.*, 1984), baseia-se em uma técnica de aprendizagem supervisionada a partir da qual são avaliadas variáveis preditoras que influenciam uma variável alvo – e.g., a adoção de inteligência artificial em empresas brasileiras; a variável dependente é binária, no caso a adoção ou não de IA.

declarada pelo respondente no momento da entrevista, como acontecia até a edição de 2015 (Comitê Gestor da Internet no Brasil, 2022).

A Aprendizagem Supervisionada (AS) é um tipo de *machine learning* que pode ser caracterizado como a busca por uma função capaz de relacionar diferentes entradas – características ou variáveis independentes, e uma saída conhecida, para um número potencialmente grande de exemplos. A inferência do modelo ocorre de modo que haja correspondência com os exemplos dados, mas também seja passível de generalização sem sacrificar a precisão. Os algoritmos de AS podem ser classificados em métodos de regressão e classificação – enquanto neste a saída do modelo é uma variável discreta, naquele é uma variável contínua (Jan *et al.*, 2023).

Segundo (Song e Lu, 2015), a construção das árvores de decisão é dada por dois componentes principais, galhos e nós. Os três tipos de nós incluem o nó raiz, a partir do qual resultará a subdivisão em dois ou mais subconjuntos; o nó interno, cuja borda superior está conectada ao seu nó pai e a borda inferior está conectada aos seus nós filhos ou nós folhas; e o nó folha (ou nó final), o qual representa o resultado final da combinação de decisões ou eventos. Por sua vez, os galhos representam resultados ou ocorrências que decorrem dos nós raiz e nós internos, os quais formam uma hierarquia de ramificações.

De forma geral, a classificação é estimada por partições binárias recursivas – em uma estrutura de inferência condicional – em três etapas: i) testa-se a hipótese nula global de independência entre qualquer uma das variáveis de entrada e a resposta, parando se ela não puder ser rejeitada. Em caso de variável de entrada significativa, aquela com associação mais forte - medida por um p-valor - é selecionada; ii) implementa-se uma divisão binária na variável de entrada selecionada; e iii) repete-se recursivamente os passos (i) e (ii) (Hothorn, Seibold e Zeileis, 2023).

A seleção da variável binária sobre a qual acontecerá a partição está associada à minimização do erro de previsão, conforme a definição de uma medida de impureza. Em cada nó é possível avaliar quão homogêneas são as observações da variável resposta ali alocadas – e.g., para variáveis categóricas um nó puro é aquele que possui somente uma classe, enquanto que um nó totalmente impuro contém a mesma proporção das diferentes classes. A partir dessa medida, realiza-se a divisão de acordo com a partição que maximiza o decréscimo de impureza (Souza, 2021).

Em problemas de classificação, usualmente a impureza $I(t)$ é medida pelo método de Gini (Nembrini, König e Wright, 2018):

$$I(t) = \sum_{j=1}^J \phi_j(t)(1 - \phi_j(t))$$

onde $\phi_j(t)$ é a frequência da classe j no nó t . Para cada possível ponto de divisão, calcula-se a diminuição na impureza que a divisão proposta traria por meio da diferença entre a impureza do nó antes da divisão e a soma ponderada das impurezas dos dois nós resultantes da divisão (Nembrini, König e Wright, 2018). A partição que resulta na maior diminuição de impureza é escolhida para dividir o nó e o processo é repetido para cada novo nó filho até que um critério de parada seja atingido.

4. Resultados e Discussão

4.1 Grau de utilização das tecnologias

Um desafio para a avaliação quanto aos determinantes da utilização de IA por meio da pesquisa TIC empresas 2021 refere-se ao fato de que as perguntas do módulo H (Novas Tecnologias) são feitas exclusivamente às empresas que informaram possuir área de TI – 44% do total. Segundo o relatório da pesquisa, isso é feito baseado no conhecimento prévio sobre a maior complexidade desse tipo de empresa em relação às demais. Sendo assim, optou-se por utilizar apenas a amostra de firmas com área de TI, sem o peso amostral, tendo em vista que este foi usado para ponderação da amostra completa. Os resultados apresentados são passíveis de interpretação e aplicáveis ao conjunto de empresas que declaram possuir setor de TI.

Nesse caso, ao não perguntar sobre adoção de novas tecnologias para firmas que não tem setor de TI, nas quais é provável que o grau de utilização, por exemplo, de aplicações de inteligência artificial, seja inferior aos demais, os resultados tendem a superestimar a adoção de IA por empresas. Ainda, a utilização da amostra parcial e a não utilização dos pesos amostrais faz com que a amostra não seja

representativa do território nacional, logo não é possível generalizar os resultados nessa direção.

A Tabela 1 e a Tabela 2 ilustram a composição das amostras para as variáveis binárias e categóricas, respectivamente.

Tabela 1 - Estatísticas descritivas para variáveis binárias

Tecnologia	Resposta	N	%
Fibra Óptica	0	197	8,5
	1	2131	91,5
ERP	0	1037	44,5
	1	1291	55,5
Processamento em nuvem	0	1323	56,8
	1	1005	43,2
Big Data	0	1925	82,7
	1	403	17,3
Robôs Industriais	0	2192	94,2
	1	136	5,8
Robôs de Serviço	0	2249	96,6
	1	79	3,4
Impressão em 3D	0	2198	94,4
	1	130	5,6
Internet das Coisas	0	1532	65,8
	1	796	34,2
Política de Segurança Digital	0	534	22,9
	1	1794	77,1
IA - Mineração de Texto	0	2208	94,8
	1	120	5,2
IA - Conversão de Linguagem Falada	0	2235	96,0
	1	93	4,0
IA - Geração de Linguagem Natural	0	2242	96,3
	1	86	3,7
IA - Reconhecimento e Processamento de Imagens	0	2080	89,3
	1	248	10,7
IA - Machine Learning	0	2171	93,3
	1	157	6,7
IA - Automatização de Fluxos de Trabalho	0	1766	75,9
	1	562	24,1
IA - Robôs, Veículos e Drones Autônomos	0	2261	97,1
	1	67	2,9
IA - Agregado	0	1551	66,6
	1	777	33,4

Fonte: Elaboração própria com dados da TIC Empresas 2021.

Com relação à utilização de tecnologias de IA de forma agregada, a porcentagem de empresas que respondeu positivamente é de 33%. Porém, ao analisar por aplicação específica, percebe-se que o maior contingente de empresas que aplica a inteligência artificial está concentrada na automatização de

processos de fluxos de trabalho, na qual 24,1% confirmaram a adoção. Em seguida, o segundo maior valor está associado a aplicação em reconhecimento e processamento de imagens – identificação de objetos ou pessoas, com quase 11% de utilização, ou seja, mais de 13 p.p. de diferença. Para as demais aplicações, a adoção da tecnologia é muito baixa – o mínimo acontece em 2,9% para utilização em movimentação física de máquinas por meio de decisões autônomas como robôs, veículos e drones autônomos.

Esses resultados preliminares já dão um indicativo da heterogeneidade da utilização de inteligência artificial sob a ótica das aplicações, e indica a área de automatização de processos de fluxos de trabalho como uma porta de entrada para empresas que muitas vezes têm dificuldade na elaboração de estratégias de transformação digital que incluam aplicações de IA.

Para as demais variáveis, a política de segurança digital é a que apresenta porcentagem mais elevada, com valores próximos a 77% de utilização pelas empresas. Entre as tecnologias com o menor grau de utilização estão os robôs de serviço (3,39%), a impressão em 3D (5,58%) e os robôs industriais (5,84%). Entre as mais adotadas do módulo H, estão IoT (34,19%) e Big Data (17,31%), além da já citada IA em sua versão agregada.

Tabela 2 - Estatísticas descritivas para variáveis demográficas das empresas

Variável	Resposta	N	%
Região	Norte	294	12,6
	Nordeste	333	14,3
	Sudeste	993	42,7
	Sul	412	17,7
	Centro-Oeste	296	12,7
CNAE	Indústria	393	16,9
	Construção	196	8,4
	Comércio	603	25,9
	Transporte	249	10,7
	Alojamento e alimentação	180	7,7
	Informação e comunicação	301	12,9
	Ativ. imobiliárias, científicas e admin.	234	10,1
	Artes, cultura e esportes	172	7,4
Porte (pessoas ocupadas)	10 – 49	1127	48,4
	50 – 249	728	31,3
	250 ou mais	473	20,3

Fonte: Elaboração própria com dados da TIC Empresas 2021.

As variáveis demográficas para a amostra com empresas que possuem setor de TI realçam a representatividade da região sudeste, com mais de 42% dos respondentes. No âmbito do setor de atuação, os três mais representativos são Comércio, Indústria, e Informação e Comunicação, e em termos de porte de empresa, as pequenas representam quase metade da amostra, enquanto médias e grandes atingem 31,3% e 20,3%, respectivamente.

De forma complementar, a Tabela 3, a seguir, detalha o grau de adoção das diferentes aplicações de IA conforme as mesmas variáveis demográficas apresentadas na Tabela 2.

Tabela 3 - Utilização de aplicações de IA conforme variáveis demográficas

	H9_A	H9_B	H9_C	H9_D	H9_E	H9_F	H9_G
Região							
Norte	4%	4%	2%	11%	6%	20%	2%
Nordeste	6%	4%	3%	10%	6%	27%	3%
Sudeste	5%	4%	4%	10%	7%	25%	3%

Sul	7%	3%	4%	11%	7%	23%	3%
Centro-Oeste	5%	7%	5%	13%	7%	23%	4%
CNAE							
Indústria	3%	2%	3%	11%	4%	26%	4%
Construção	5%	4%	4%	11%	5%	21%	4%
Comércio	5%	4%	3%	8%	8%	23%	2%
Transporte	5%	4%	5%	15%	9%	26%	3%
Alojamento e alimentação	4%	1%	0%	7%	1%	12%	2%
Informação e comunicação	8%	6%	6%	9%	12%	31%	2%
Ativ. imobiliárias, científicas e admin.	6%	6%	6%	14%	8%	29%	4%
Artes, cultura e esportes	6%	4%	2%	13%	5%	20%	2%
Porte							
10 – 49	6%	4%	4%	10%	6%	21%	3%
50 – 249	4%	3%	3%	9%	7%	25%	2%
250 ou mais	5%	4%	5%	15%	8%	31%	4%

Fonte: Elaboração própria com dados da TIC Empresas 2021.

Os padrões mais claros que resultam da Tabela 3 estão associados ao porte das empresas, na medida em que, conforme o aumento no número de empregados, a porcentagem de empresas que confirma a adoção de IA também cresce. Isso é evidente nas aplicações de machine learning (6%, 7% e 8% para empresas pequenas, médias e grandes, respectivamente) - H9_E, e automatização de processos de fluxos de trabalho (21%, 25% e 31% para pequenas, médias e grandes, respectivamente) - H9_F. O único caso em que as grandes empresas não têm porcentagem maior ou igual às demais refere-se à aplicação de IA em mineração de texto e análise da linguagem escrita - H9_A.

Com relação aos setores de atuação, destaque para o CNAE de Informação e Comunicação, no qual a utilização de IA é mais elevada em todas as aplicações, exceto para reconhecimento e processamento de imagens - H9_D, e movimentação física de máquinas por meio de decisões autônomas - H9_G. No que concerne à utilização de IA dividida por regiões, parece não haver nenhum padrão que se destaque.

4.2 Adoção de IA

Para melhor caracterizar a adoção de IA por empresas brasileiras, procede-se com a aplicação do método de árvores de decisão (no caso classificação, dado que a variável dependente é binária). A relação entre as variáveis é dada conforme a equação abaixo.

$$IA = f(fibra, erp, nuvem, bigdata, roboin, roboser, imp3D, IoT, seg, regioao, cnae, porte)$$

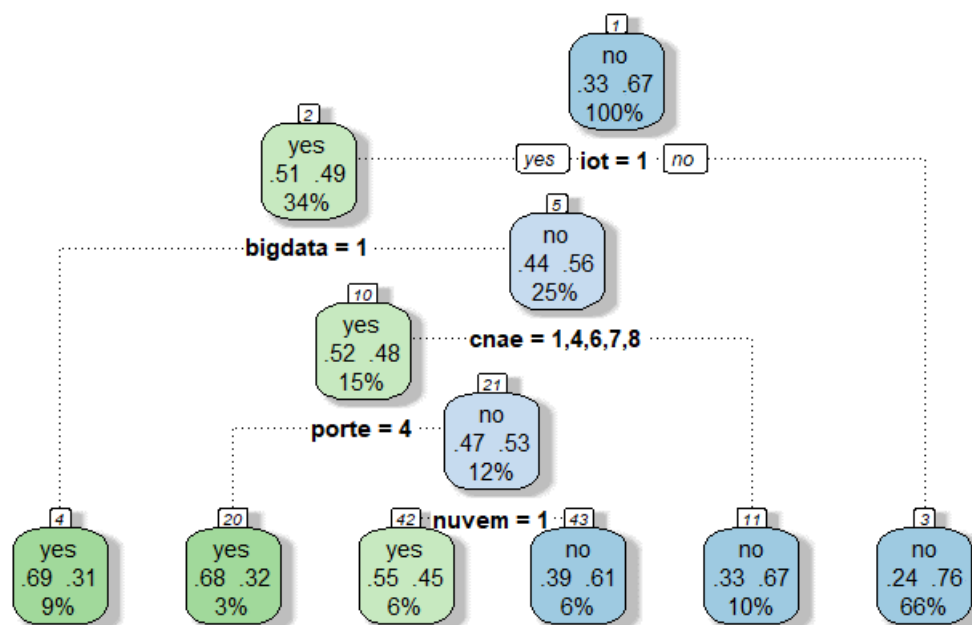
A Figura 1 exibe os resultados para a árvore de decisão que classifica as variáveis mais relevantes no processo de caracterização da adoção de IA em empresas brasileiras. Cinco variáveis – IoT, Big Data, CNAE, porte e nuvem – são utilizadas como regras para as divisões binárias, gerando 6 nós folha ao final do processo. Internet das coisas e Big Data, as variáveis que aparecem nos dois primeiros lugares, respectivamente, são as mais significativas para reduzir a impureza dos dados no processo de classificação e predizer pela adoção de IA no caso de assumirem valor unitário. Compreendidas no nó folha de número 4, firmas que adotam IoT e Big Data também adotam IA em 69% das vezes.

Outros nós folha que contém mais de 50% de empresas adotantes de IA são os de números 20 e 42. Para o nó folha 20, há adoção de IoT, mas não de Big Data, e as empresas estão nos CNAEs 1, 4, 6, 7 e 8, e são de grande porte. Para o nó folha 42, mantêm-se a trajetória anterior, porém para os portes de médias e pequenas e a adoção de computação em nuvem.

Pelo lado das empresas que não adotam IA, a simples ausência de Internet das coisas na empresa resulta no conjunto com o maior número de observações, qual seja o nó folha de número 3 – 66% da amostra está nesse nó, no qual 76% das empresas não adotam nenhum tipo de aplicação de IA. Outro grupo no qual a adoção de IA é baixa, com 10% da amostra total, caracteriza-se pela adoção de IoT, pela

não adoção de Big Data, e pelo pertencimento aos CNAEs 2, 3 e 5.

Figura 1 - Árvore de decisão para caracterizar a adoção de IA por empresas brasileiras



Fonte: Elaboração própria com dados da TIC Empresas 2021.

Ao avaliar a performance de modelos de árvore de decisão com variáveis categóricas, observa-se que o critério de Gini tende a favorecer variáveis com mais pontos de corte possíveis (mais categorias) para escolha dos pontos de divisão (Nembrini, König e Wright, 2018). No entanto, conforme Figura 1, constata-se uma exceção a essa tendência: as variáveis IoT e Big Data, as quais não se enquadram na categorização de alta cardinalidade, mas sim de natureza binária, surgiram como as mais importantes, contrariando um possível viés do modelo e ressaltando a importância crítica dessas tecnologias como preditores.

Os resultados têm semelhanças com (Rosa e Kubota, 2023) na medida em que Internet das coisas e análise de Big Data também apareceram entre os principais determinantes da adoção de IA por meio da utilização de métodos paramétricos de estimação. Porém, algumas diferenças são dignas de nota, por exemplo a relevância das variáveis referentes a CNAE e porte da empresa, as quais não foram estatisticamente significativas no trabalho citado, e a variável de política de segurança digital, que em (Rosa e Kubota, 2023) influenciou positivamente a adoção de IA, mas neste trabalho teve expressão muito reduzida.

Com relação à influência do porte da empresa sobre a adoção de IA, corrobora-se uma gama de estudos empíricos que sustentam impactos positivos, de forma geral, sobre a adoção de TICs, conforme exposto em (Ruiz *et al.*, 2023). Segundo Calvino e Fontanelli (2022), grandes firmas têm vantagens de escala, ativos intangíveis, além de maiores quantidades de dados para alavancar aplicações de IA e menores restrições financeiras. Ainda, conforme pesquisa em indústrias (CNI, 2022), quanto maior o porte, maior o uso de pelo menos uma tecnologia digital nas empresas, além de haver relação direta entre o porte e a quantidade de tecnologias adotadas.

Na análise do comportamento das empresas brasileiras em relação à adoção de IA por meio de árvores de decisão, uma ferramenta estatística importante baseia-se na matriz de confusão. Gerada a partir dos resultados da árvore de decisão, ela permite uma inspeção detalhada da precisão com que o modelo consegue prever a variável alvo. Ao comparar as previsões do modelo com os resultados reais, é possível não apenas avaliar a eficácia da árvore em capturar os fatores determinantes da adoção, mas também identificar padrões de acertos e erros que são cruciais para refinar estratégias de implementação e políticas de incentivo à inovação tecnológica.

Quadro 3 - Matriz de confusão com resultados observados e previstos

Observado \ Previsto	Sim	Não
Sim	273	150
Não	504	1401

Fonte: Elaboração própria com dados da TIC Empresas 2021.

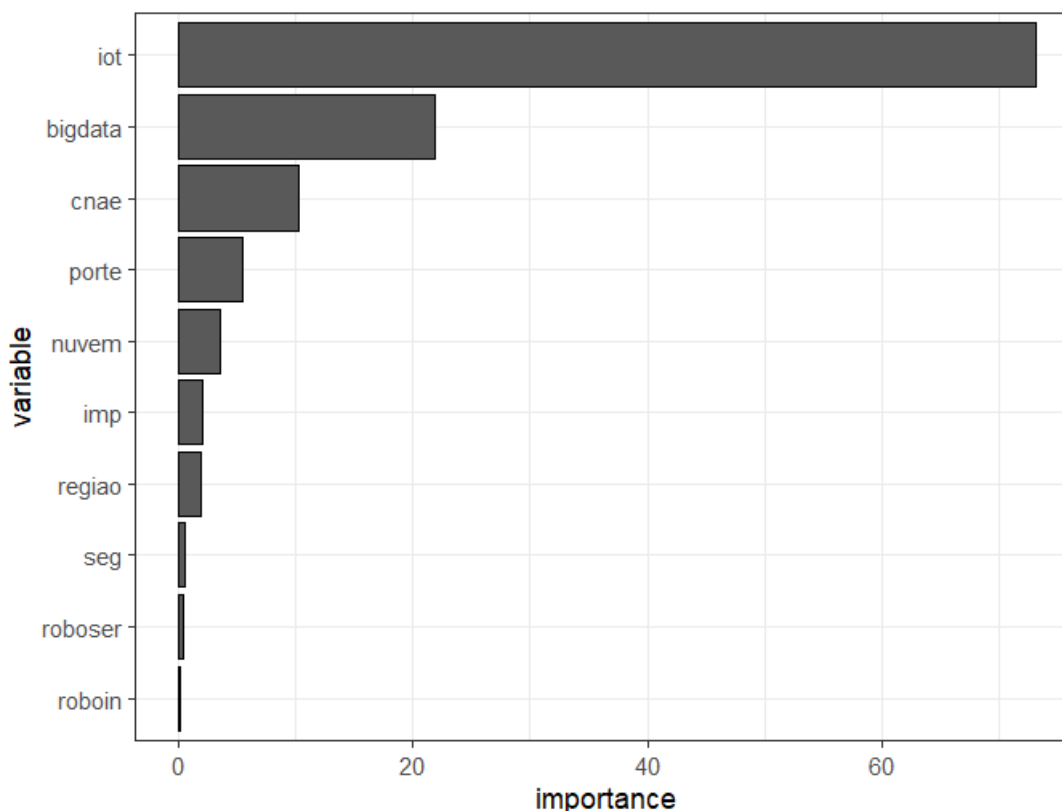
De acordo com os resultados obtidos, a matriz revela que, para os casos de adoção de IA, o modelo previu corretamente 273 ocorrências, mas falhou em identificar 504 casos, o que sugere necessidade de melhorias em termos de sensibilidade (0,35). No espectro dos casos de não adoção, o modelo demonstrou uma melhor performance, com 1401 previsões corretas contra 150 incorretas, ou seja, a especificidade é elevada (0,90). A acurácia geral dos resultados foi de 71,9%.

A dificuldade no que tange à capacidade do modelo de identificar adequadamente os casos de adoção de IA pode estar relacionada ao desbalanceamento entre os casos de adoção (1/3) e não adoção (2/3) da tecnologia. Tal desequilíbrio na precisão das previsões entre as categorias pode sugerir também a necessidade de modelos mais avançados de métodos não paramétricos, por exemplo *random forests*.¹¹ Uma simulação para avaliar o cenário da adoção de IA com mais detalhes poderia envolver a utilização de aplicações específicas de tal tecnologia, por exemplo a automatização de processos de fluxos de trabalho. Porém, neste caso o desbalanceamento da amostra tenderia a agravar-se e dificultaria ainda mais a qualidade dos resultados.

O software RStudio permite ainda a classificação das variáveis por ordem de importância – ferramenta utilizada principalmente quando a mesma variável aparece em mais de uma divisão. Conforme (Therneau e Atkinson, 2023), uma medida geral da importância de cada variável é a soma das medidas de qualidade de divisão para cada divisão na qual ela foi a variável principal, somada à medida ajustada, caso exista, para todas as divisões nas quais ela foi um substituto. Na tabela de resultados, esses valores são dimensionados para somar 100, omitindo-se qualquer variável cuja proporção seja inferior a 1%.

¹¹ Simulações preliminares com a inclusão de validação cruzada, separação em conjuntos de treino e teste, entre outras técnicas foram capazes de elevar a acurácia do modelo para em torno de 76%, porém ao custo de dificultar a interpretabilidade dos resultados dada a extensão da árvore.

Figura 2 - Importância das variáveis para explicar a adoção de IA nas empresas



Fonte: Elaboração própria com dados da TIC Empresas 2021.

Conforme Figura 2, a Internet das coisas é a variável mais relevante para explicar a diminuição da impureza no processo de classificação das empresas quanto à adoção de IA, representando aproximadamente 73% do total. A segunda variável é referente à tecnologia de Big Data, com quase 22%, e, entre as 5 primeiras colocadas, a quinta variável também é de natureza tecnológica, qual seja a utilização de computação em nuvem. Nas posições 3 e 4 aparecem variáveis demográficas – CNAE e Porte – as quais representam aproximadamente 5,5% e 3,6% da totalidade.

Os achados deste estudo corroboram com a perspectiva de maturidade digital delineada na seção dedicada à revisão de literatura.¹² A transição para estágios mais sofisticados de digitalização, exemplificados pelo emprego de modelos de operação autônomos, pressupõe a pré-existência de determinados dispositivos, como sensores essenciais para a etapa de "Visualização", que tem por objetivo permitir um entendimento claro sobre os eventos correntes dentro da empresa. Da mesma forma, a implementação de Big Data se faz necessária para o "Entendimento", ou seja, facilitando a compreensão das razões subjacentes aos fenômenos observados no ambiente empresarial. Frequentemente, a adoção dessas tecnologias demanda uma infraestrutura robusta de computação em nuvem, essencial para o armazenamento seguro e eficiente, assim como para o processamento adequado dos vastos volumes de dados gerados.

Embora com importância menor, observou-se também que a aplicação de tecnologia de impressão 3D, robôs de serviços e robôs industriais apresentaram algum impacto sobre o processo de adoção de IA pelas firmas. Em contrapartida, a qualidade da conectividade, avaliada através da disponibilidade de conexões de fibra óptica, e a utilização de sistemas integrados de gestão empresarial (ERP), não demonstraram relação com a implementação de IA. Essa observação sugere que, apesar da importância reconhecida da infraestrutura tecnológica avançada, tais elementos não são determinantes diretos ou garantem a adoção de IA nas práticas empresariais atuais.

¹² Em outro estudo já publicado, os autores do presente artigo investigam – a partir da TIC Empresas 2021 - a intensidade de adoção de um conjunto de tecnologias relacionadas ao conceito de indústria 4.0 – processamento em nuvem, big data, robôs industriais e de serviços, impressão 3D, IoT, IA e política de segurança digital por firmas brasileiras.

4.3 Limitações da pesquisa

Por um lado, este estudo enfrenta uma limitação importante, particularmente no que diz respeito à temporalidade da coleta de dados versus a apresentação dos resultados. Os dados analisados foram coletados em 2021, antes de eventos marcantes relacionados à IA, incluindo o lançamento global do ChatGPT pela OpenAI em novembro de 2022 e a subsequente introdução da versão Plus deste serviço no Brasil em março de 2023. Tais desenvolvimentos representam impactos potenciais na adoção da tecnologia por empresas brasileiras. Logo, é razoável supor que os determinantes da adoção de IA por empresas no Brasil, conforme identificados com base nos dados de 2021, podem ter sofrido variações no período subsequente, o que sugere a necessidade de cautela na interpretação dos resultados e destaca a importância de pesquisas futuras para capturar as dinâmicas evolutivas da adoção de IA no contexto empresarial brasileiro após 2021.

Por outro lado, os autores participaram de reunião de especialistas sobre os resultados da TIC Empresas 2023, e, como seria de se esperar, não existe grande variação nos resultados, considerando-se o cenário anterior à introdução dos algoritmos de IA generativa.

5. Discussão e considerações finais

Este trabalho objetivou avaliar possíveis determinantes da adoção de IA por empresas brasileiras por meio da utilização de um modelo não paramétrico de árvores de decisão, com dados da pesquisa TIC Empresas 2021.

A pesquisa revelou cinco fatores primordiais que descrevem o processo pelo qual as empresas brasileiras adotam a IA, identificando três aspectos tecnológicos – a integração da Internet das Coisas, a utilização de Big Data e a computação em nuvem – além de dois elementos demográficos – a Classificação Nacional de Atividades Econômicas e o tamanho da empresa. A posição proeminente de duas tecnologias que servem de base para a IA, no modelo de árvores de decisão, reforça a teoria de que a maturidade digital das empresas é um fator crucial para caracterizar a sua evolução tecnológica. Essa maturidade sugere que inovações como a IA dependem significativamente de tecnologias de apoio, como sensores – essenciais para que os gestores tenham uma visão clara dos processos internos da empresa – e ferramentas avançadas para análise de grandes volumes de dados, que são indispensáveis para compreender os fenômenos que ocorrem no ambiente empresarial.

Do ponto de vista das políticas para a IA no Brasil, observa-se uma liderança de legislativo na discussão sobre o assunto. Existem diversos regulamentos sendo discutidos no Congresso, sendo as mais importantes o projeto de lei (PL) 20/2021, já aprovado pela Câmara dos Deputados, e o PL 2338/2023, em discussão no Senado Federal. No âmbito do Executivo, recentemente iniciou-se a discussão sobre a atualização da Estratégia Brasileira de Inteligência Artificial, e muito recentemente o Presidente da República incumbiu o Conselho Nacional de Ciência e Tecnologia de elaborar uma proposta de política para a inteligência artificial para o Brasil.

Considerando-se que as políticas vigentes de IoT e de IA são independentes entre si, a partir dos resultados do estudo sublinha-se a importância de conceber a transformação digital de maneira integrada e abrangente. Apesar da atenção quase exclusiva concedida à IA, especialmente após o advento do ChatGPT, torna-se evidente a necessidade de políticas que fomentem uma abordagem harmonizada, contemplando um espectro mais amplo de tecnologias. Em outras palavras, a análise e a promoção da IA não devem ocorrer isoladamente, mas sim em conjunto com outras tecnologias correlatas, visando uma estratégia de digitalização mais coesa e eficaz.

O presente estudo baseou-se em um modelo não paramétrico relativamente simples. Para estudos futuros, sugere-se a utilização de técnicas mais avançadas com vistas a ampliar e melhorar os processos de parametrização em abordagens supervisionadas.

6. Referências

- ARBIX, G. *et al.* O BRASIL E A NOVA ONDA DE MANUFATURA AVANÇADA: O que aprender com Alemanha, China e Estados Unidos. **Novos estud.**, v. 36, n. 3, p. 29–49, nov. 2017.
- BAABDULLAH, A. M. *et al.* SMEs and artificial intelligence (AI): Antecedents and consequences of AI-based B2B practices. **Industrial Marketing Management**, v. 98, p. 255–270, out. 2021.
- BHALERAO, K. *et al.* A Study of Barriers and benefits of Artificial Intelligence Adoption In Small and Medium Enterprise. **Academy of Marketing Studies Journal**, v. 26, p. 1–6, 2022.
- BREIMAN, L. *et al.* **Classification and Regression Trees**. [s.l.] Chapman & Hall/CRC, 1984.
- CAIRA, C.; PERSET, K. **The future of artificial intelligence**: Working Party on Artificial Intelligence Governance. Paris: OECD, 2023.
- CALVINO, F.; FONTANELLI, L. **A portrait of AI adopters across countries: firm characteristics, assets' complementarities, and productivity**. Paris: OCDE, 14 nov. 2022.
- CNI. **Especial Survey: Industry 4.0**: CNI Indicators. [s.l.] CNI, abr. 2016. Disponível em: <http://elais.inf.utfsm.cl/wp-content/uploads/2017/08/t-ir-travassos-special_survey_industry4.0.pdf>. Acesso em: 8 fev. 2023.
- ____. **Indústria 4.0 - Cinco anos depois**, abr. 2022. Disponível em: <<https://www.portaldaindustria.com.br/estatisticas/sondesp-83-industria-40-cinco-anos-depois/>>. Acesso em: 8 maio. 2023
- COMITÊ GESTOR DA INTERNET NO BRASIL. **Pesquisa sobre o uso das tecnologias de informação e comunicação nas empresas brasileiras [livro eletrônico] : TIC Empresas 2021**, 2022. Disponível em: <<https://cetic.br/pt/publicacao/pesquisa-sobre-o-uso-das-tecnologias-de-informacao-e-comunicacao-nas-empresas-brasileiras-tic-empresas-2021/>>. Acesso em: 17 mar. 2023
- DORA, M. *et al.* Critical success factors influencing artificial intelligence adoption in food supply chains. **International Journal of Production Research**, v. 60, n. 14, p. 4621–4640, 18 jul. 2022.
- EZELL, S.; LAZAR, V. **The adoption and diffusion of artificial intelligence in firms: A review of the evidence**. Paris: OCDE, 2 dez. 2022.
- HANSEN, E. B.; BØGH, S. Artificial intelligence and internet of things in small and medium-sized enterprises: A survey. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 58, p. 362–372, jan. 2021.
- HOTHORN, T.; SEIBOLD, H.; ZEILEIS, A. **Package ‘partykit’**, 14 abr. 2023. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/web/packages/partykit/partykit.pdf>>. Acesso em: 3 maio. 2023
- IBM. **IBM Global AI Adoption Index 2022**, 2022. Disponível em: <<https://www.ibm.com/downloads/cas/GVAGA3JP>>. Acesso em: 22 jul. 2023
- JAN, Z. *et al.* Artificial intelligence for industry 4.0: Systematic review of applications, challenges, and opportunities. **Expert Systems with Applications**, v. 216, p. 119456, abr. 2023.
- KHANIJAHANI, A. *et al.* Organizational, professional, and patient characteristics associated with artificial intelligence adoption in healthcare: A systematic review. **Health Policy and Technology**, v. 11, n. 1, p. 100602, mar. 2022.
- KOLBERG, D.; KNOBLOCH, J.; ZÜHLKE, D. Towards a lean automation interface for workstations. **International Journal of Production Research**, v. 55, n. 10, p. 2845–2856, 19 maio 2017.
- KUBOTA, L. C.; LINS, L. M. **New technologies and innovation in enterprises**: Internet Sectoral Overview. São Paulo: Cetic.br, set. 2022.
- LIMA, F. R.; GOMES, R. Conceitos e tecnologias da Indústria 4.0: uma análise bibliométrica. **Revista Brasileira de Inovação**, v. 19, p. e0200023, 28 dez. 2020.
- LU, H.-P.; WENG, C.-I. Smart manufacturing technology, market maturity analysis and technology roadmap in the computer and electronic product manufacturing industry. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 133, p. 85–94, ago. 2018.
- NEMBRINI, S.; KÖNIG, I. R.; WRIGHT, M. N. The revival of the Gini importance? **Bioinformatics**, v. 34, n. 21, p. 3711–3718, 1 nov. 2018.

- NEUMANN, O.; GUIRGUIS, K.; STEINER, R. Exploring artificial intelligence adoption in public organizations: a comparative case study. **Public Management Review**, v. 26, n. 1, p. 114–141, 2 jan. 2024.
- OCDE. **The goals and practices of institutions supporting AI diffusion in firms**. Paris: OCDE, 2 dez. 2022.
- ROSA, M. B.; KUBOTA, L. C. **Inteligência artificial no Brasil: produção científica e determinantes da adoção pelas empresas**Anais... **Anais... Em: 51º ENCONTRO NACIONAL DE ECONOMIA**. Rio de Janeiro: ANPEC, 2023Disponível em: <<https://en.anpec.org.br/>>
- RUIZ, A. U. *et al.* Factors determining the path of digital technologies adoption of Brazilian industrial firms. **Revista Brasileira de Inovação**, v. 22, p. 1–35, 13 nov. 2023.
- SCHUH, G. *et al.* **Industrie 4.0 Maturity Index**ACATECH, , 2020.
- SONG, Y.; LU, Y. Decision tree methods: applications for classification and prediction. **Shanghai Archives of Psychiatry**, v. 27, n. 2, p. 130–135, 2015.
- SOUZA, C. B. D. **Árvores de decisão: a evolução do CART ao BART**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 13 dez. 2021.
- THERNEAU, T. M.; ATKINSON, E. J. **An Introduction to Recursive Partitioning Using the RPART Routines**, 5 dez. 2023. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/web/packages/rpart/vignettes/longintro.pdf>>. Acesso em: 14 fev. 2024
- WANG, K.-L.; SUN, T.-T.; XU, R.-Y. The impact of artificial intelligence on total factor productivity: empirical evidence from China's manufacturing enterprises. **Economic Change and Restructuring**, v. 56, n. 2, p. 1113–1146, abr. 2023.