

Título do capítulo	CAPÍTULO 3 ADOÇÃO DE TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0 POR EMPRESAS BRASILEIRAS
Autor(es)	Luis Claudio Kubota Maurício Benedeti Rosa
DOI	DOI: http://dx.doi.org/10.38116/9786556350660cap3

Título do livro	Digitalização e tecnologias da informação e comunicação: oportunidades e desafios para o Brasil
Organizadores(as)	Luis Claudio Kubota
Volume	1
Série	-
Cidade	Rio de Janeiro
Editora	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea)
Ano	2024
Edição	1a
ISBN	9786556350660
DOI	DOI: http://dx.doi.org/10.38116/9786556350660

© Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – ipea 2024
© Nações Unidas 2024
LC/BRS/TS.2024/1

As publicações do Ipea estão disponíveis para *download* gratuito nos formatos PDF (todas) e EPUB (livros e periódicos). Acesse: <https://repositorio.ipea.gov.br/> e <https://www.cepal.org/es/publications>

As opiniões emitidas nesta publicação são de exclusiva e inteira responsabilidade dos autores, não exprimindo, necessariamente, o ponto de vista do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada ou do Ministério do Planejamento e Orçamento e da Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe (CEPAL) ou as dos países que representa.

É permitida a reprodução deste texto e dos dados nele contidos, desde que citada a fonte. Reproduções para fins comerciais são proibidas. Os Estados-membros das Nações Unidas e suas instituições governamentais podem reproduzir este estudo sem autorização prévia. É solicitado, apenas, que mencionem a fonte e informem à CEPAL sobre essa reprodução.

Este estudo foi elaborado no âmbito do Programa Executivo de Cooperação entre a CEPAL e o Ipea.

Os limites e nomes mostrados nos mapas incluídos neste documento não implicam o seu endosso oficial ou aceitação pelas Nações Unidas.

ADOÇÃO DE TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0 POR EMPRESAS BRASILEIRAS¹

Luis Claudio Kubota²
Maurício Benedeti Rosa³

1 INTRODUÇÃO

A denominação indústria 4.0 surgiu como uma iniciativa do governo alemão, em 2011, para incentivar a manufatura digital por meio do aumento da digitalização e da interconexão entre produtos, cadeias de valor e modelos de negócio, além de dar suporte a atividades de pesquisa (European Commission, 2017). É caracterizada por máquinas conectadas, produtos e sistemas inteligentes e soluções integradas, que permitem unidades de produção inteligentes responsáveis por monitorar e controlar dispositivos físicos. Assim, a indústria 4.0 permite a produção de forma autônoma e dinâmica – isto é, uma produção em massa de itens customizados (Lasi *et al.*, 2014; Tortorella e Fettermann, 2018).

Inserida num contexto de digitalização – isto é, de convergência contínua dos mundos real e virtual como o principal motor de inovação e mudança em todos os setores da economia (Kagermann, 2015), a indústria 4.0 representa a atual tendência das tecnologias de automação na indústria de manufatura – base para aumentar o nível geral de industrialização, informatização e digitalização e assim alcançar maior eficiência, competência e competitividade. Inclui tecnologias habilitadoras, como sistemas ciberfísicos (*cyber-physical systems* – CPS), internet das coisas (*internet of things* – IoT) e computação em nuvem, as quais, combinadas com tecnologias emergentes, podem melhorar drasticamente complexos ecossistemas industriais (Xu, Xu e Li, 2018).

A integração das tecnologias da indústria 4.0 aos sistemas de trabalho atuais, incluindo quais processos elas são capazes de suportar, ainda está em aberto (Kolberg, Knobloch e Zühlke, 2017), de tal forma que, apesar de perspectivas promissoras, as fronteiras do fenômeno da indústria 4.0 ainda são bastante difusas (Lima e Gomes, 2020). A fase inicial deste novo ciclo permite que tecnologias

1. Estudo elaborado a partir de Acordo de Cooperação entre o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea) e o Núcleo de Informação e Coordenação do Ponto BR (NIC.br).

2. Técnico de planejamento e pesquisa na Diretoria de Estudos e Políticas Setoriais, de Inovação, Regulação e Infraestrutura (Diset) do Ipea.

3. Bolsista do Subprograma de Pesquisa para o Desenvolvimento Nacional (PNPD) na Diset/Ipea.

existentes, baseadas na era industrial, coexistam com tecnologias de ponta. Essa mistura evidencia a falta de uma transformação tecnológica claramente definida, tornando extremamente importante que as economias em desenvolvimento se preparem por meio de políticas públicas que apoiem a inovação (Arbix *et al.*, 2017).

No Brasil, alguns autores ressaltaram preocupações quanto ao atraso na inserção do país em acompanhar a quarta revolução industrial – por exemplo, citando falta de iniciativas governamentais, baixa prioridade para inovação em termos de políticas públicas, entre outros. Porém, nos últimos anos foram empreendidos projetos importantes com o objetivo de fomentar a evolução tecnológica no âmbito nacional, entre as quais destacam-se a Estratégia Brasileira para a Transformação Digital (e-Digital) e o Plano Nacional de Internet das Coisas. A partir deste plano criou-se a Câmara Brasileira da Indústria 4.0 (Câmara I4.0), com o objetivo de promover o diálogo entre atores do setor público e representantes dos setores industriais e da academia a fim de formular e implementar iniciativas públicas e privadas voltadas para a adoção de tecnologias 4.0 pela indústria brasileira.

Em nível de empresas, por meio de diversas pesquisas, tornou-se passível de verificação que há muitas dificuldades para a adoção de novas tecnologias de forma mais abrangente. Entre elas, é possível salientar níveis baixos de conhecimento de novas tecnologias, em particular em pequenas empresas, falta de mão de obra qualificada para lidar com processos de transformação digital, além da necessidade de altos investimentos e a dificuldade de acesso a incentivos e financiamento adequado.

Dado o destaque cada vez maior que as tecnologias 4.0 – como inteligência artificial (IA) – têm assumido para garantir aos países índices de produtividade mais elevados e relevância no cenário internacional, é de extrema importância entender como determinadas características das empresas brasileiras influenciam os seus respectivos processos de adoção de tecnologias 4.0, de forma a auxiliar na superação de desafios por meio de políticas elaboradas com maior assertividade. Para tanto, este trabalho utiliza-se de modelagens paramétricas e não paramétricas, com dados da pesquisa TIC Empresas 2021, para contribuir sobre os determinantes da adoção de tecnologias 4.0 em empresas brasileiras.

O capítulo está organizado em cinco seções, além desta introdução. A seção 2 traz uma revisão de literatura sobre a indústria 4.0, com destaque para a descrição dos documentos propostos pela Câmara I4.0. A seção 3 apresenta a metodologia – modelo logit, modelo linear generalizado e árvores de decisão –, a seção 4 apresenta os resultados, a seção 5, as discussões e, como desfecho, as considerações finais seguem na seção 6.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Ao longo da história da industrialização, os saltos tecnológicos provocaram mudanças de paradigma, que mais tarde foram denominadas revoluções industriais. Nesse sentido, a digitalização avançada dentro das fábricas servindo de pano de fundo para a associação de tecnologias de internet com máquinas e produtos inteligentes parece originar uma nova mudança de paradigma na produção industrial, denominada de quarta revolução industrial (Lasi *et al.*, 2014). No entanto, em comparação com as revoluções industriais anteriores, os efeitos da atual revolução são mais extensos e afetam também os departamentos industriais indiretos, além da produção, especialmente os processos de engenharia. Portanto, o potencial de crescimento da produtividade neste caso está associado a melhorias no trabalho intelectual e nos processos de tomada de decisão. Da mesma maneira, torna-se possível reproduzir a complexidade das cadeias de valor, retratando as redes globais de produção de forma holística, o que ajuda a otimizar seu *design* e configuração e oferece uma vantagem crucial: a transparência – gargalos no fluxo de trabalho podem ser facilmente isolados (Schuh *et al.*, 2014).

De acordo com Lasi *et al.* (2014), alguns conceitos fundamentais relacionados à indústria 4.0 são: i) fábrica inteligente – a manufatura é totalmente equipada com sensores, atuadores e sistemas autônomos; ii) CPS – os níveis físico e digital se fundem, de modo que as condições reais do sistema resultam do objeto físico e dos parâmetros do processo digital; iii) auto-organização – a hierarquia de produção é substituída por sistemas de manufatura descentralizados; iv) novos sistemas de distribuição, compras e desenvolvimento de produtos e serviços, cada vez mais individualizados; v) sistemas de manufatura projetados para atender às necessidades humanas; e vi) responsabilidade social corporativa – por exemplo, sustentabilidade e eficiência na utilização de recursos.

Schuh *et al.* (2014) argumentaram que uma das principais características da indústria 4.0 é promover a colaboração entre departamentos, a qual pode tornar as empresas mais competitivas. Segundo os autores, esse crescimento de produtividade depende de facilitadores como poder de computação e tecnologia da informação global, *softwares* com gestão completa do ciclo de vida dos produtos, entre outros. Em relação aos mecanismos para aumentar a produtividade, os autores sugerem que as fábricas inteligentes podem minimizar o tempo de desenvolvimento do produto, dada a possibilidade de simular a produção enquanto o artigo está sendo confeccionado, ou seja, o processo é passível de exposição e eliminação de barreiras desde o início. Finalmente, os sistemas auto-otimizados podem trabalhar com eficiência no ponto ótimo de operação, adaptando-se a mudanças repentinas nos processos de produção.

No caso da Alemanha, Kagermann e Wahlster (2022) fizeram uma avaliação das mudanças ocorridas nos últimos dez anos – desde a introdução da indústria 4.0. De acordo com os autores, nas novas fábricas do complexo manufatureiro alemão os sistemas de produção ciberfísicos e a IoT já são realidade e a conectividade das máquinas preexistentes teve forte crescimento, sucesso este relacionado ao amplo apoio dos principais pilares da sociedade e à cooperação efetiva de indústria, sistema político, academia e sindicatos. Ainda, como novas megatendências da indústria 4.0, são citadas a IA industrial, computação de borda até a *edge cloud*, 5G na fábrica, *team robotics*, sistemas intralogísticos autônomos e infraestruturas de dados confiáveis.

A IA, possivelmente a tecnologia mais proeminente do atual cenário, tem gerado promessas de ganhos de produtividade, melhoria de bem-estar e atuação como importante ferramenta para endereçar grandes desafios, tais como o aquecimento global. Embora ainda parem questões e desafios associados a confiabilidade, privacidade, segurança, entre outros, a tecnologia tem se mostrado cada vez mais popular,⁴ de modo que o Observatório de Políticas de Inteligência Artificial da Organização para a Cooperação e o Desenvolvimento Econômico (OCDE) já documenta mais de oitocentas iniciativas de política em 69 jurisdições (Caira e Perset, 2023).

Com o 5G cada vez mais tornando-se realidade, a indústria 4.0 também é parte importante de estudos na área de redes móveis. Um exemplo partiu do Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (Institute of Electrical and Electronics Engineers – IEEE), sendo denominado International Network Generations Roadmap (INGR), com a proposta de apontar para “tendências, desafios e soluções no cenário atual e de curto prazo das redes móveis, e a visão futura que está sendo desenvolvida por meio das atividades das Organizações de Desenvolvimento de Padrões (SDOs) e da indústria em todo o mundo” (IEEE, 2022a, p. 1, tradução nossa).⁵ Composto de quatorze grupos de trabalho, o INGR tratou da indústria 4.0 – também chamada de internet industrial das coisas (*industrial internet of things* – IIoT) – com mais detalhes no grupo denominado *edge services and automation* (IEEE, 2022b), o qual elucidou casos de uso atraentes para as tecnologias de borda alavancadas pelo 5G, entre as quais a indústria 4.0. No grupo de *applications and services*, colocou-se como exemplo que essa nova forma de produção industrial ainda não foi totalmente explorada, de tal maneira que o 5G pode impactar significativamente esse domínio nos próximos anos (IEEE, 2022c).

4. Pesquisa e desenvolvimento de políticas para IA já figuram nas agendas nacionais com grandes investimentos. Países têm procurado atualizar suas respectivas legislações, regulamentos e padrões associados à tecnologia, além de buscar iniciativas incluindo parcerias estratégicas de cooperação internacional para a promoção de uma IA confiável (Caira e Perset, 2023).

5. “Trends, challenges, and solutions in the current and near-term mobile network landscape, and the future vision as being cultivated through the activities of Standards Development Organizations (SDOs) and the industry around the globe.”

Segundo o IEEE (2022b), a indústria 4.0 refere-se ao uso de IoT para permitir a digitalização inteligente juntamente com técnicas de IA e aprendizado de máquina⁶ aplicados à manufatura. Entre os principais guias da indústria 4.0 estão a automação com inteligência e a transformação digital visando à elevação de produtividade. Nesse contexto, as soluções de mercado envolvem *softwares* para serviços em nuvem, gerenciamento de energia, conectividade, controladores, telerrobótica, entre outros. Não menos importante, destaca-se a necessidade dos mais diversos tipos de sensores e a crescente relevância de análise de dados na automação industrial e, conseqüentemente, na indústria 4.0.

Um conjunto de trabalhos utilizou-se de análises bibliométricas para caracterizar os estudos associados à indústria 4.0 em diversas frentes – como na conceituação das principais tecnologias e na apresentação dos países que se destacam na produção científica mundial (Lima e Gomes, 2020), na estrutura de crescimento das pesquisas sobre o tema (Muhuri, Shukla e Abraham, 2019), na identificação de conhecimentos e habilidades que devem ser desenvolvidas pela mão de obra da área (Kipper *et al.*, 2021) e na descrição da relação existente entre a indústria 4.0 e o tema da sustentabilidade (Furstenau *et al.*, 2020).

Internacionalmente, a distribuição geográfica dos estudos associados ao tema de indústria 4.0 concentra-se sobretudo em Alemanha, China e Estados Unidos, embora Itália e Reino Unido também sejam atores relevantes – a depender da base de dados utilizada. Ainda, no que concerne à área de estudo, a pesquisa em indústria 4.0 é conduzida principalmente pelas áreas de engenharia e ciência da computação (Ahmi, Elbardan e Raja Mohd Ali, 2019; Kipper *et al.*, 2020; Lima e Gomes, 2020; Muhuri, Shukla e Abraham, 2019).

No Brasil, o debate sobre a indústria 4.0 tem buscado identificar, além dos possíveis impactos em termos de produtividade da indústria, outras oportunidades para a transformação estrutural da economia, a qual se mostra exposta aos avanços que já se tornaram realidade em outros países, dada a sua baixa capacidade de inovação tecnológica, bem como sua dependência das *commodities* (Arbix *et al.*, 2017). Diversos autores expressaram preocupação quanto à capacidade do Brasil em conseguir acompanhar a presente revolução industrial e conseqüentemente aproveitar as possíveis recompensas dos *early adopters*.

Vieira, Ouriques e Arend (2020) sintetizaram políticas associadas ao paradigma da quarta revolução industrial em sete países: Estados Unidos, Alemanha, França, Reino Unido, Japão, Coreia do Sul e China. Segundo os autores, ponto

6. Um dos grupos de trabalho do INGR é denominado *artificial intelligence and machine learning (AI/ML)*, o qual propõe-se a descrever áreas potenciais em que tais ferramentas podem ser usadas para impactar positivamente o 5G e redes futuras – como *network automation*, *network slicing*, *network digital twins*, cibersegurança, computação em nuvem, *multi-access edge computing* e *dynamic spectrum access* (IEEE, 2022d).

importante e comum entre eles referiu-se à relevante atuação do Estado como líder de projetos ligados à implantação da chamada indústria 4.0. No Brasil, entretanto, ressaltaram que a inovação parece não ter sido encarada como uma prioridade na política pública, colocando como principais problemas a ausência de uma política de Estado, falta de continuidade, recursos financeiros insuficientes e incerteza na execução orçamentária.

De forma semelhante, Arbix *et al.* (2017), ao reconhecerem as dificuldades inerentes ao Brasil e temendo a marginalização do país no processo de consolidação da indústria 4.0, sintetizaram semelhanças entre os três maiores expoentes das inovações tecnológicas – Estados Unidos, Alemanha e China –, que poderiam ser utilizadas como ponto de partida para a estratégia brasileira de manufatura avançada. As semelhanças entre os três países citados incluíram, entre outras, trabalhar com foco, prioridades e alto volume de recursos; preparar o caminho para indústrias emergentes; aumentar o diálogo e promover a colaboração público-privada; criar fundos de capital de risco e apoiar *startups* de tecnologia; promover a internacionalização de empresas e instituições de inovação; e estabelecer marcos regulatórios amigáveis à inovação.

Kupfer (2016) explicou o desconhecimento das empresas brasileiras em relação à indústria 4.0 pela falta de um debate nacional, argumentando que há poucas iniciativas governamentais nesse sentido e que são escassos os seminários com a presença de especialistas, o que revela a baixa prioridade dada ao tema.⁷ Além disso, o autor destacou a necessidade de investimentos institucionais e regulatórios como precondições para a difusão da indústria 4.0.

Por meio de análise bibliométrica, Nascimento (2021) destacou a Universidade de São Paulo (USP) e a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) como instituições referências em estudos sobre indústria 4.0 no Brasil. Com relação ao fomento às pesquisas e tecnologias, entidades públicas como a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) e o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) destacaram-se como as principais financiadoras. Ainda, o mapeamento de conhecimentos-chave associados à indústria 4.0 evidenciou tendências na utilização de IoT e IA no contexto da manufatura nacional.

Diversas pesquisas feitas junto às empresas ajudam a traçar a evolução desse panorama em território nacional. Em 2016, a Confederação Nacional da Indústria (CNI) realizou um estudo para determinar os principais desafios para a implantação das tecnologias da indústria 4.0. Os resultados indicaram o baixo

7. Velho e Barbalho propõem a criação de um Observatório da Indústria 4.0 como forma de fomentar a discussão e disseminação das tecnologias 4.0 e estreitar a relação entre a academia e o setor produtivo “para fins científicos e de comercialização do conhecimento” (2019, p. 15).

conhecimento da nova tecnologia, 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 desafio externo central. De forma complementar, as empresas brasileiras argumentaram que o governo deveria focar em infraestrutura – por exemplo, desenvolvimento de infraestrutura digital, como banda larga e sensores para acelerar a adoção de tecnologias digitais, e também educação, investindo em novos modelos educacionais e programas de treinamento (CNI, 2016).

A partir de versão atualizada da pesquisa cinco anos depois, CNI (2022) apontou aumento na utilização de tecnologias 4.0 por empresas industriais, embora, em sua maioria, em quantidade pouco expressiva, indicando baixa maturidade no processo de digitalização. Como principais benefícios obtidos foram indicados aumento de produtividade, maior qualidade de produtos e serviços e redução de custos operacionais. Com relação aos desafios, os resultados mantiveram-se semelhantes: alto custo de implantação foi a principal barreira interna⁸ e falta de trabalhadores qualificados a barreira externa central.

A popularização das tecnologias 4.0 bem como os vários obstáculos para sua adoção foram captados também por outras análises. Uma pesquisa feita pelo Centro de Gestão de Estudos Estratégicos (CGEE) com 75 empresas, em sua maioria de médio e grande porte (CGEE, 2021), demonstrou forte mudança no cenário mencionado por CNI (2016) ao revelar que apenas 5% das empresas declararam não ter conhecimento sobre os conceitos da indústria 4.0. Ainda, os resultados colocaram questões de competitividade, redução de custos e produtividade como principais fatores para a adoção de novas tecnologias – IoT, sensores inteligentes, computação em nuvem, *big data* e IA. Como principais desafios, foram realçadas dificuldades no uso das novas tecnologias, necessidade de altos investimentos e falta de trabalhadores qualificados. Conclusões semelhantes surgiram em pesquisa realizada com 135 empresas vinculadas à Associação Brasileira da Indústria de Máquinas e Equipamentos (Abimaq). O levantamento apontou obstáculos como dificuldades de acesso a incentivos para aquisição de tecnologias avançadas – grande parte das empresas depende de recursos próprios como fonte de investimento, principalmente as de menor porte –, além de melhorias na formação e preparação de trabalhadores e questões relativas à segurança de dados (Abimaq e NEO, 2021).

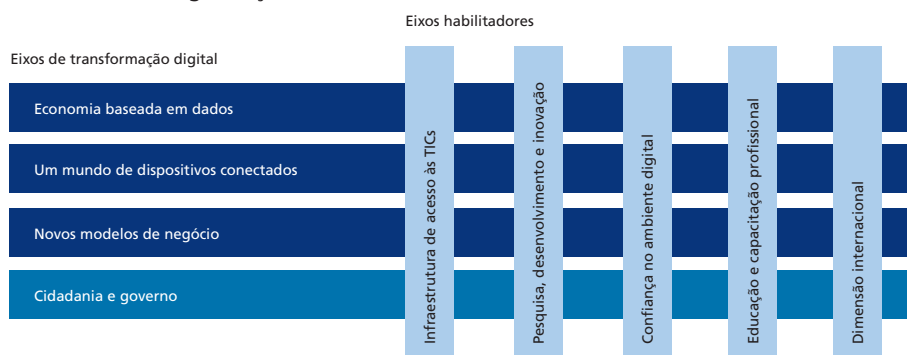
Apesar das dificuldades estruturais apontadas pela literatura, iniciativas importantes foram desenvolvidas no Brasil nos últimos anos com o intuito de apoiar

8. Em pequenas e médias empresas (PMEs), ressaltou-se também a falta de conhecimento técnico sobre tecnologias digitais como importante barreira interna, a qual evidencia a necessidade de melhor difusão do conhecimento das tecnologias 4.0 entre as micro, pequenas e médias indústrias (MPMIs).

a transformação digital do país e, conseqüentemente, a indústria 4.0. Neste contexto, destacam-se a e-Digital e o Plano Nacional de Internet das Coisas. Foi como uma das estratégias desse plano que surgiu a Câmara I4.0.

A e-Digital é dividida em dois grandes eixos temáticos: i) eixos habilitadores; e ii) eixos de transformação digital, conforme detalhado na figura 1. Enquanto os eixos habilitadores são compreendidos como aqueles que vão formar as bases para que a transformação digital aconteça, o segundo grupo envolve as estratégias para promover a evolução digital das atividades do governo e da economia.

FIGURA 1
Matriz de organização dos eixos temáticos



Fonte: CGEE e MCTI (2022).

Obs.: TICs – tecnologias da informação e comunicação.

Dentro da e-Digital, a indústria 4.0 tem diversas iniciativas associadas. Entre os objetivos específicos da transformação digital da economia, a indústria aparece como uma das áreas prioritárias para o desenvolvimento de soluções tecnológicas, sendo inserida no objetivo geral de estímulo à informatização, ao dinamismo, à produtividade e à competitividade da economia brasileira.

No âmbito de pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I), são consideradas ações estratégicas estimular investimentos públicos e privados para as demandas da indústria, além de promover diálogos entre o setor e representantes de governo e academia, de forma a garantir políticas abrangentes, convergentes e coordenadas. Para o eixo envolvendo educação e capacitação profissional, propõe-se o estímulo a cursos técnicos e programas de pós-graduação alinhados a demandas dos setores produtivos – por exemplo, com temas da indústria 4.0.

Com relação aos eixos de transformação digital, muitas ações estratégicas têm aplicabilidade no setor industrial, incluindo questões de interoperabilidade e processos baseados em dados, bem como estímulo à inovação aberta para acesso a novas tecnologias. O eixo abrangendo dispositivos conectados tem especial

relevância por detalhar as potencialidades da IoT no setor industrial, sobre as quais são propostas ações: de fomento ao desenvolvimento e implantação de plataformas para validação e avaliação das soluções de IoT; de escalabilidade e replicabilidade das plataformas abertas nacionais de IoT; plataformas IoT abertas; e *Robot as a Service* (RaaS), entre outros. Não menos importante, coloca-se a necessidade de se criar e fomentar plataformas para o desenvolvimento de novos modelos de negócios aplicáveis a um contexto de acelerada evolução tecnológica.

Inserido na e-Digital está o Plano Nacional de Internet das Coisas, caracterizado de forma mais abrangente no capítulo 4. A indústria 4.0 é uma das verticais indicadas como prioritárias pelo plano, tornando-se referência para acesso a mecanismos de fomento à pesquisa científica, ao desenvolvimento tecnológico e à inovação, bem como apoio ao empreendedorismo de base tecnológica. Para atividades de assessoramento e acompanhamento da implementação do plano, a Câmara I4.0⁹ foi formalizada em 3 em abril de 2019, com coordenação compartilhada pelos ministérios da Economia e da Ciência, Tecnologia e Inovações, além da participação de atores da sociedade nas estruturas de governança e nos Grupos de Trabalho (GT).¹⁰

O Plano de Ação da Câmara I4.0 apresenta um conjunto de iniciativas distribuídas entre os grupos de trabalho, conforme o quadro 1. Para cada ação proposta, há ainda uma ou mais medidas associadas, as quais são detalhadas de acordo com sua natureza – por exemplo, projeto ou ação contínua, além de informações quanto à entidade responsável, impactos esperados e prazo para execução. As revisões do plano podem provocar adição ou exclusão de ações e iniciativas segundo novas necessidades ou a conclusão de projetos.

QUADRO 1

Ações de cada GT conforme o Plano de Ação 2019-2022

GT	Ações
1. Desenvolvimento tecnológico e inovação: desafios e medidas para promover a inovação e o desenvolvimento de tecnologias habilitadoras e soluções da indústria 4.0 por empresas no Brasil	Identificar segmentos ou nichos com maior potencial para desenvolvimento tecnológico nacional
	Estruturar rede de sistemas para o desenvolvimento e a demonstração de tecnologias associadas à indústria 4.0 aplicada a setores prioritizados
2. Capital humano: desafios para dispor de recursos humanos qualificados para atuarem no ambiente da indústria 4.0 e no desenvolvimento de tecnologias relacionadas	Promover a formação e requalificação de professores em competências e habilidades para a economia 4.0
	Viabilizar a qualificação, o aperfeiçoamento e a requalificação de profissionais para a economia 4.0
	Estimular competências e habilidades educacionais para a economia 4.0

(Continua)

9. Disponível em: <https://camara40.com.br/>. Acesso em: 17 fev. 2023.

10. Para mais detalhes quanto ao modelo de governança das câmaras IoT, ver capítulo 4.

(Continuação)

GT	Ações
3. Cadeias produtivas e desenvolvimento de fornecedores: desafios para promover a adoção de tecnologias habilitadoras e soluções para a indústria 4.0 em empresas de todos os portes visando ao aumento da produtividade	Fomentar o desenvolvimento de produtos e processos compartilhados entre <i>startups</i> e grandes empresas
	Apoiar a inserção de empresas na indústria 4.0, em especial as micro, pequenas e médias empresas (MPMEs)
	Dar suporte a programas de desenvolvimento da cadeia de valor da indústria 4.0
4. Regulação, normalização técnica e infraestrutura: criar ou aperfeiçoar instrumentos de normalização e regulação e desenvolver infraestruturas visando à melhoria do ambiente para o desenvolvimento da indústria 4.0 no Brasil	Estimular a oferta de recursos financeiros para promover o desenvolvimento tecnológico voltado para a indústria 4.0
	Promover o estabelecimento e a difusão de regulamentos e normas e técnicas relacionados à indústria 4.0
	Estimular a oferta de infraestruturas e ambientes tecnológicos apropriados para suporte da indústria 4.0

Elaboração dos autores.

O plano abrange também uma ação da Secretaria Executiva baseada em propor, implementar e monitorar ações que aprimorem o funcionamento da Câmara I4.0, bem como trazer transparência, engajamento e eficiência.

No endereço virtual da câmara, as iniciativas são divididas em seis grandes grupos: i) regulação – normas e legislação; ii) infraestrutura – conectividade e aplicações; iii) acesso a recursos – fomento e financiamento; iv) conhecimento – estudos e mapeamento; v) capital humano – capacitação e diagnósticos; e vi) MPME – desenvolvimento e adoção de novas tecnologias. As próximas subseções abordam em mais detalhes cada um deles.

2.1 Regulação

Com a proposta de fornecer subsídios para a elaboração de um *roadmap* da normalização brasileira, CGEE (2021) buscou priorizar os temas mais relevantes a partir das necessidades de empresas e grupos de interesse envolvidos com a indústria 4.0, enquanto CGEE (2020), ao condicionar a realização da indústria 4.0 ao estabelecimento de normas técnicas – padrões e referências comuns adotados por vários elos da cadeia de valor –, trouxe uma revisão de literatura incluindo *benchmark* internacional – por exemplo, de Alemanha e Estados Unidos, e atuação dos principais organismos de normalização internacional no contexto da indústria 4.0 – como a Organização Internacional de Normalização (International Organization for Standardization – ISO) e a Comissão Eletrotécnica Internacional (International Electrotechnical Commission – IEC). Entre as diversas recomendações, colocou-se como imprescindível a participação e colaboração do Brasil com organizações internacionais, além de ações de capacitação, coordenação e comunicação junto à indústria e aos demais grupos de interesse (CGEE, 2021). Ainda, CGEE (2020) ressaltou elementos como liderança do governo, processo de governança apropriado

e estratégia com metas e objetivos claros para aumentar as chances de sucesso das iniciativas.

Na proposta de trabalho de um *roadmap*¹¹ brasileiro para a normalização para a indústria 4.0, a câmara dedicada a este tema propôs dezenove capítulos, iniciando por semântica, normalização da terminologia e modelos de referência, passando por segurança e proteção de TI, código aberto e casos de uso, para finalizar com *design* do ambiente de trabalho e projeto de trabalho de apoio à aprendizagem e ao desenvolvimento de competências. Em cada proposta de capítulo, foram disponibilizadas também as respectivas descrições e justificativas. Um importante passo para concretizar esse processo foi dado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), que criou, em julho de 2021, a Comissão de Estudo Especial da Indústria 4.0 (ABNT/CEE-254),¹² referente à normalização dessa fase da industrialização e visando fortalecer o processo de transformação digital da indústria brasileira, compreendendo a aplicação e a integração das tecnologias digitais.

2.2 Infraestrutura

As iniciativas de infraestrutura têm foco nos temas de conectividade e aplicações – por exemplo, redes que suportem o tráfego de grande volume de dados e aplicações que conectem os dispositivos, para suportar o desenvolvimento de tecnologias 4.0. Nesse cenário, destaca-se a chegada da tecnologia 5G e das redes privadas – referenciadas aos endereços virtuais de Anatel,¹³ Deloitte¹⁴ e Ericsson¹⁵ para detalhes –, bem como a difusão da IoT.

O 5G é parte importante do processo de transformação digital ao endereçar desafios de conectividade de organizações industriais, como falta de cobertura, confiabilidade do sinal e velocidade da rede. Ao suportar grandes quantidades de tráfego, com segurança, confiabilidade e baixa latência, o 5G pode propiciar a conexão em massa de inúmeros dispositivos e, combinado com outras tecnologias, “elevar a eficiência e a produtividade da indústria como um todo, ajudando em seu processo de transformação” (Spadinger, 2021, p. 10).

De maneira semelhante, a IoT, uma “rede aberta e abrangente de objetos inteligentes que possuem a capacidade de se auto-organizar, compartilhar informações, dados e recursos, reagindo e agindo diante de situações e mudanças no ambiente” (Madakam, Ramaswamy e Tripathi, 2015, p. 165), é uma das bases para a implementação da indústria 4.0, em conjunto com outras tecnologias.

11. Disponível em: https://camara40.com.br/wp-content/uploads/2021/04/Apresentacao-estudo-Roadmap-Industria-4_0.pdf.

12. Disponível em: <http://rotulo.abnt.org.br/temas-estrategicos/industria-4>. Acesso em: 1 mar. 2023.

13. Disponível em: <https://www.gov.br/anatel/pt-br/assuntos/5G/tecnologia-5g>. Acesso em: 1 mar. 2023.

14. Disponível em: <https://www2.deloitte.com/us/en/pages/technology-media-and-telecommunications/topics/5g-technology.html>. Acesso em: 1º mar. 2023.

15. Disponível em: <https://www.ericsson.com/en/5g>. Acesso em: 1º mar. 2023.

Kubota e Rosa (2023) realizaram uma breve descrição de políticas de fomento à IoT e casos de sucesso no panorama brasileiro.

No que concerne às aplicações no contexto da indústria 4.0, CGEE (2022) partiu do entendimento de que novas tecnologias podem gerar diferentes impactos a depender do setor estudado, para então buscar a identificação de setores promissores quanto à aplicação de tecnologias da indústria 4.0 no Brasil. Baseados em quatro relatórios nacionais (CNI, 2017; Daudt, Miguez e Willcox, 2018; IEDI, 2019; IEL, 2018), os autores determinaram 22 “setores brasileiros tidos como estratégicos para a indústria 4.0 no país” (CGEE, 2022, p. 68), entre os quais oito foram mais citados, e conseqüentemente detalhados em subtópicos. O quadro 2 apresenta as novas tecnologias tidas como mais relevantes para cada um dos principais setores selecionados.

QUADRO 2

Setores estratégicos para a indústria 4.0 no Brasil e novas tecnologias associadas

Setor	Novas tecnologias
Automotivo	IoT; <i>data analytics</i>
Petróleo e gás	<i>Big data</i> ; IoT; computação em nuvem; robótica; IA; <i>wearables</i>
Farmacêutico	IoT; <i>big data</i> ; <i>blockchain</i> ; impressão 3D
Têxtil	IoT; sistemas ciberfísicos; impressão 3D; biotecnologia; química verde
Químico	<i>Machine learning</i> ; <i>big data</i> ; impressão 3D; biotecnologia
Alimentos e bebidas	Computação em nuvem; gêmeos digitais; <i>big data</i> ; IoT
Agroindústria	IoT; IA; <i>blockchain</i>
Aeroespacial e defesa	IA; computação em nuvem; realidade virtual; realidade aumentada; impressão 3D; <i>blockchain</i> ; IoT

Fonte: CGEE (2022).
Elaboração dos autores.

2.3 Acesso a recursos

Esta subseção aponta algumas alternativas de financiamento associadas à implementação de tecnologias 4.0, duas delas oferecidas pela Financiadora de Estudos e Projetos (Finep) – Inovacred 4.0 e Finep IoT –, e duas pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) – Crédito Serviços 4.0 e Finame Máquinas 4.0.

O Finep Inovacred 4.0¹⁶ é uma iniciativa, para empresas brasileiras, de apoio ao desenvolvimento e à aplicação de soluções de digitalização com tecnologias habilitadoras da indústria 4.0 – por exemplo: IoT; computação em nuvem; *big data*; segurança digital; manufatura aditiva; manufatura digital; integração de sistemas;

16. Disponível em: <http://www.finep.gov.br/apoio-e-financiamento-externa/programas-e-linhas/inovacred4-0>. Acesso em: 2 mar. 2023.

digitalização; sistema de simulação; robótica avançada; e IA. Por sua vez, o Finep IoT¹⁷ utiliza como referência o conceito de IoT para basear o desenvolvimento de novos produtos, processos e serviços cujos planos estratégicos devem estar alinhados com um ou mais de três eixos de atuação: i) soluções digitais baseadas em IoT e demais tecnologias habilitadoras, buscando integração de ambientes virtuais e físicos em processos fabris; ii) diagnóstico feito por consultoria especializada quanto à priorização na adoção de tecnologias habilitadoras pela empresa; e iii) implementação de estratégias nos processos produtivos das empresas.

No que concerne ao BNDES, além do Crédito Serviços 4.0, já abordado no capítulo 4, existe o Finame Máquinas 4.0,¹⁸ referente ao financiamento de itens como máquinas e equipamentos, sistemas industriais, componentes e bens de informática, os quais devem conter tecnologias associadas a soluções de manufatura avançada¹⁹ ou serviços de IoT.²⁰

Em outro exemplo, a Finep e o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) lançaram em 2020 o primeiro edital²¹ na temática de tecnologias 4.0, ou seja, visando o fomento e a seleção de projetos de inovação nas temáticas indústria 4.0, agro 4.0, cidades inteligentes e saúde 4.0, por meio da concessão de recursos de subvenção econômica para o desenvolvimento de produtos, processos e/ou serviços inovadores dentro do escopo das respectivas linhas temáticas e tecnologias habilitadoras. O montante disponibilizado de recursos não reembolsáveis do Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FNDCT) totalizou R\$ 50 milhões, sendo R\$ 15 milhões para a indústria 4.0.

2.4 Conhecimento

Há algumas propostas interessantes a fim de identificar, organizar e disponibilizar iniciativas relacionadas à adoção das tecnologias da indústria 4.0 no Brasil.

A plataforma Mapeamento 4.0,²² um projeto do então MCTIC e do Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (Senai)/Departamento Nacional, busca mapear e ordenar iniciativas da indústria 4.0 para orientar e subsidiar decisões de políticas e ações de ciência, tecnologia e inovação no Brasil, de modo a facilitar

17. Disponível em: <http://www.finep.gov.br/apoio-e-financiamento-externa/programas-e-linhas/finep-iot>. Acesso em: 2 mar. 2023.

18. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/produto/bndes-finame-maquinas-40>. Acesso em: 2 mar. 2023.

19. Robótica, transportes autônomos, inteligência artificial, computação em nuvem, manutenção preditiva, monitoramento de desempenho, realidade aumentada, comunicação máquina a máquina, manufatura híbrida e manufatura aditiva.

20. Projeto, integração de equipamentos e componentes para conectividade, programação para coleta e análise dos dados, *software* e serviços correlatos à implantação.

21. Disponível em: <http://www.finep.gov.br/chamadas-publicas/chamadapublica/643>. Acesso em: 6 out. 2022.

22. Disponível em: <https://mapeamento40.mctic.gov.br/#/home>. Acesso em: 3 mar. 2023.

o processo de adoção da indústria 4.0 no Brasil. De forma complementar, uma parceria entre a Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI) e a Fundação Getúlio Vargas (FGV) propôs duas ferramentas, o Painel de Monitoramento da Digitalização da Economia²³ e o Índice de Transformação Digital do Brasil.²⁴ Enquanto este utilizou quatro dimensões (estrutura produtiva, ambiente empresarial, cultura digital e segurança e participação) para comparar como as transações da economia brasileira estão ocorrendo no universo digital, em relação a um conjunto de outros países, o painel objetivou observar e monitorar o fenômeno da digitalização da economia do Brasil comparado a outros países por meio de seis dimensões (infraestrutura, inclusão digital, emprego, negócios, inovação e e-cidadania) e 49 indicadores.

Ao considerar que a falta de conhecimento sobre aplicações de tecnologias avançadas representa forte barreira para a indústria 4.0, o Núcleo de Engenharia Organizacional (NEO) utilizou o conceito de demonstradores – espaços que têm por objetivo apresentar tecnologias e conceitos dessa onda industrial para desenvolver e massificar soluções complexas²⁵ – para propor recomendações quanto à possível implementação no Brasil (NEO, 2020). Por meio de entrevistas com especialistas da Câmara I4.0, após a devida classificação e conceitualização de cada tipo de demonstrador, considerou-se que *testbeds*, *learning factories* e plantas didáticas teriam uma maior relevância para o cenário brasileiro. Em relação aos *stakeholders* com maior potencial de contribuição, enquanto grupos de empresas em colaboração seriam os principais para *testbeds*, instituições de ensino e pesquisa seriam mais relevantes para *learning factories* e plantas didáticas.

2.5 Capital humano

Entre estudos que buscaram diagnosticar as competências necessárias para a indústria 4.0, NEO (2021) procurou identificar profissões emergentes na era digital num contexto de recuperação verde pós-pandemia, em setores considerados chave para tal – entre eles *software* e tecnologia da informação (TI) e indústria de transformação e serviços produtivos. Por meio de entrevistas com instituições públicas e privadas representativas dos setores, estudos anteriores, bem como bases de dados sobre oferta e demanda profissional, foram identificadas como profissões mais relevantes nos dois setores acima mencionados: i) programador, cientista de dados e analista de segurança cibernética – *software* e TI; e ii) *expert* em digitalização, profissional de manufatura aditiva e operador digital – indústria de transformação. Em termos de competências, destacou-se a necessidade de novas

23. Disponível em: <https://ptd.abdi.com.br/>. Acesso em: 3 mar. 2023.

24. Disponível em: <https://itd.abdi.com.br/>. Acesso em: 3 mar. 2023.

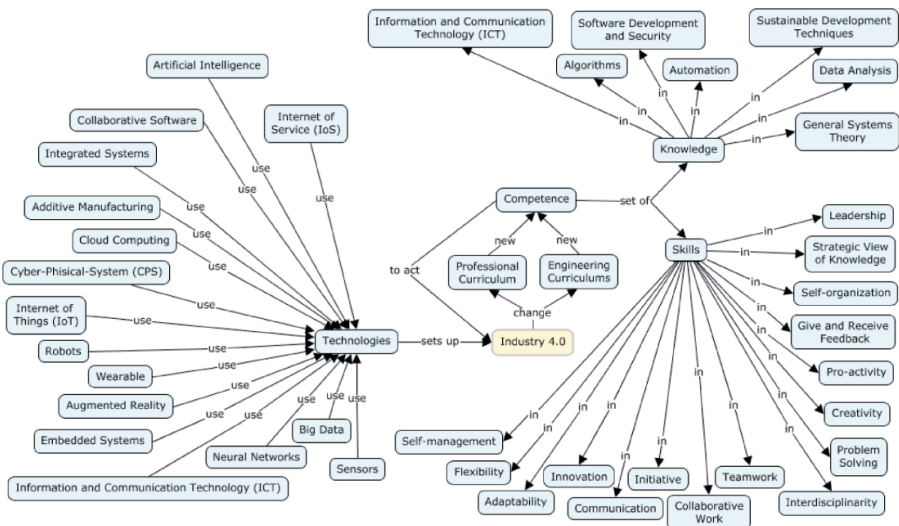
25. Os sete demonstradores presentes no estudo foram: *testbeds*, *showcases*, plantas didáticas, *learning factories*, *living labs*, *testlabs*, *lighthouses*.

habilidades que incluam o equilíbrio de capacidades técnicas e de serviço para lidar com os novos modelos de negócio servitizados.

Em um estudo bibliométrico mais abrangente, Kipper *et al.* (2021) objetivaram identificar quais competências (conhecimentos e habilidades),²⁶ segundo a literatura – publicações das bases Scopus, Web of Science (WoS) e Science Direct entre os anos de 2010 e 2018 –, os profissionais devem ter para adaptação ao contexto da indústria 4.0. A figura 2 apresenta um mapa conceitual com as tecnologias associadas à indústria 4.0 e as competências necessárias aos profissionais que se propõem a acompanhar esse intenso processo de evolução tecnológica.

FIGURA 2

Mapa conceitual das transformações para a indústria 4.0



Fonte: Kipper *et al.* (2021).

Obs.: Figura cujos leiaute e textos não puderam ser padronizados e revisados em virtude das condições técnicas dos originais (nota do Editorial).

2.6 MPME

No que tange às MPMEs, a Câmara I4.0 trouxe o Programa Brasil Mais como oportunidade para aumento dos níveis de produtividade e competitividade. Coordenado pelo Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços (MDIC) e implementado junto à ABDI, ao Senai, ao Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas (Sebrae) e ao BNDES, o programa auxilia na

26. Como competência compreende-se a capacidade do ser humano em atender demandas complexas, ou seja, ir além de elementos cognitivos e aspectos funcionais para englobar atributos interpessoais e valores éticos (os quais incluem habilidade, conhecimento e atitude) (Kipper *et al.*, 2021).

“adoção de melhorias de gestão e soluções digitais de rápida implementação, baixo custo e alto impacto, além de fomentar o desenvolvimento de novas tecnologias”.²⁷ Tendo atendido mais de 117 mil empresas desde novembro de 2020, são três as possíveis modalidades de atendimento: i) entrada – melhoria de práticas gerenciais e otimização da linha de produção; ii) transformação digital – implantação de soluções digitais para maior produtividade; e iii) *smart factory* – desenvolvimento e adoção de soluções 4.0. Entre os resultados, destacaram-se ganhos médios de produtividade de 68% em linha de produção.

Com influência do Plano Nacional de IoT e do Programa Brasil Mais, o Fórum Econômico Mundial (WEF, 2020), em parceria com o Ministério da Economia do Brasil e o governo estadual de São Paulo, propôs um protocolo de políticas para intensificar a adoção de novas tecnologias em PMEs, de tal forma a ajudar os formuladores de políticas a realizarem uma quarta revolução industrial mais inclusiva. Testado inicialmente em dez PMEs de manufatura nos setores automotivo e aeronáutico do estado de São Paulo, o protocolo teve suas intervenções divididas em quatro áreas, as quais são detalhadas no quadro 3.

QUADRO 3

Protocolo de políticas para incentivar a indústria 4.0

Intervenção	Categoria	Detalhes
Elevar a conscientização	Ferramentas de avaliação de maturidade	Avaliar prontidão tecnológica em várias dimensões e comparar maturidade com outras empresas
	Fábricas demonstrativas	Tornar processos decisórios mais tangíveis para PMEs
	Catálogo de casos de uso	Ponto de partida para PMEs adaptarem às próprias situações
	Plataformas <i>online</i>	<i>Sites</i> com práticas recomendadas, histórias de sucesso e informações úteis
Suporte de especialistas	Treinamento de trabalhadores	Treinamentos <i>online</i> e práticos para preencher lacuna de conhecimento de funcionários de PMEs
	Treinamento da gerência	Conhecimento comercial e tecnológico para adoção de novas tecnologias
	Ferramentas de código aberto	Ponto de partida para conscientização e posterior adaptação/adequação ao negócio individual
	Serviços de consultoria direta	Fornecer experiência e maior confiança durante o ciclo de vida da tecnologia
Suporte financeiro	Prova de conceito ou piloto	Incentivo à experimentação e adoção de novas tecnologias
	Suporte externo especializado	Redução de custos de consultoria, abordando desafios de escalabilidade e lacunas de conhecimento
	Treinamento de trabalhadores	Encorajamento ao desenvolvimento de soluções tecnológicas
	Implementação	Encorajamento da transformação digital das PMEs
Ambiente colaborativo	Comunidades <i>online</i>	Acesso a potenciais parceiros de negócios e colegas, espaço seguro para compartilhamento de melhores práticas e lições aprendidas
	Ambientes de colaboração	Consolidação de <i>clusters</i> e <i>hubs</i> para PMEs

Fonte: WEF (2020).

Elaboração dos autores.

27. Disponível em: <https://brasilmaisprodutivo.mdic.gov.br/>.

Outra iniciativa presente no Brasil e chancelada pelo WEF é o Centro para a Quarta Revolução Industrial (C4IR)²⁸ – feito em parceria com o governo federal, governo estadual de São Paulo e a iniciativa privada. Com foco “na formulação de políticas públicas e parcerias que contribuam para o desenvolvimento e a aplicação de tecnologias inovadoras de maneira ética, inclusiva, acelerando e ampliando os benefícios de tecnologias emergentes”,²⁹ a seção dedicada à indústria traz projetos envolvendo manutenção preditiva, tecnologias 4.0 e inovação em modelos de negócio, entre outros.

Exemplo recente de estratégia promissora para a popularização das tecnologias 4.0 nas MPMEs refere-se à Jornada de Transformação Digital,³⁰ uma parceria entre a Federação das Indústrias do Estado de São Paulo (Fiesp), o Centro das Indústrias do Estado de São Paulo (Ciesp), o Senai-SP e a Sebrae-SP. A iniciativa tem a capacidade de atender, em quatro anos, a 40 mil MPMEs de todos os segmentos industriais no estado de São Paulo e o atendimento pode envolver até oito etapas de consultoria e treinamento, as quais foram detalhadas no capítulo 4.

3 METODOLOGIA

3.1 Base de dados

Para avaliação dos determinantes da adoção de tecnologias 4.0 por empresas brasileiras, o estudo empírico foi desenvolvido a partir dos microdados da pesquisa TIC Empresas 2021. Conforme CGI.Br (2022), para construção da amostra de respondentes nesse levantamento, utilizou-se da técnica de amostragem estratificada, cujos estratos naturais são formados pelo cruzamento das variáveis região geográfica e mercado de atuação CNAE 2.0, a partir dos quais são definidos os estratos finais – que consideram a divisão dos estratos naturais por porte da empresa.

As empresas foram contatadas por meio da técnica de entrevista telefônica assistida por computador. Em todas as companhias pesquisadas, buscou-se entrevistar o responsável pela área de informática, tecnologia da informação, gerenciamento da rede de computadores ou área equivalente. Nas organizações 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 companhias existentes no estrato e o tamanho da amostra no estrato final correspondente. Houve ainda correção de não resposta para

28. Disponível em: <https://c4ir.org.br/>. Acesso em: 7 mar. 2023.

29. Disponível em: <https://c4ir.org.br/quem-somos/>.

30. Disponível em: <https://bit.ly/3H2m60T>. Acesso em: 1ª mar. 2023.

os casos em que não se obteve os retornos de todos os selecionados. Da amostra planejada de 7 mil empresas, foram concluídas 4.064 entrevistas entre os meses de agosto de 2021 e abril de 2022.

O quadro 4 apresenta detalhes quanto às variáveis utilizadas no estudo.

QUADRO 4
Descrição das variáveis utilizadas

Variável	Descrição
Região	Corresponde à divisão regional do Brasil, segundo critérios do IBGE, nas macrorregiões: i) Norte; ii) Nordeste; iii) Sudeste; iv) Sul; e v) Centro-Oeste
Porte ¹	Corresponde à divisão por pequenas, médias e grandes empresas conforme o número de pessoas ocupadas: i) 10 a 49 pessoas ocupadas; ii) de 50 a 249 pessoas ocupadas; e iii) 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: i) indústria de transformação; ii) construção; iii) comércio e reparação de veículos automotores, objetos pessoais e domésticos; iv) transporte, armazenagem e correio; v) alojamento e alimentação; vi) informação e comunicação; vii) atividades imobiliárias + atividades profissionais, científicas e técnicas + atividades administrativas e serviços complementares; e viii) artes, cultura, esportes e recreação + outras atividades de serviços
D11	A sua empresa possui uma política para a segurança digital?
B18_1_4	Nos últimos doze meses, a empresa pagou por serviço de capacidade de processamento em nuvem?
H1	Nos últimos doze meses, a sua empresa fez análises de <i>big data</i> ?
H3_A	Nos últimos doze meses, a sua empresa utilizou robôs industriais, como robôs usados para soldagem robótica, corte a <i>laser</i> , pintura por pulverização etc.?
H3_B	Nos últimos doze meses, a sua empresa utilizou robôs de serviço, como robôs usados para vigilância, limpeza, transporte etc.?
H5	Nos últimos doze meses, sua empresa realizou impressão em 3D?
H7	Sua empresa usa dispositivos ou sistemas interconectados que podem ser monitorados ou controlados remotamente pela internet, conhecidos como dispositivos inteligentes, ou IoT?
H9_AGREG	IA para ao menos uma entre diversas aplicações ²
Ind4.0	Grau de aderência da empresa às tecnologias 4.0: soma das tecnologias 4.0 ³ (variáveis binárias B18_1_4, H1, H3_B, H5, H7 e H9_AGREG); pode variar de 0 a 6.

Fonte: CGI.Br (2022).

Elaboração dos autores.

Notas: ¹ Destaca-se que, desde a edição 2017, a informação divulgada tem como base aquela disponível no cadastro e não a declarada pelo respondente no momento da entrevista, como acontecia até a edição de 2015 (CGI.Br, 2022).

² 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: *machine learning*, como *deep learning*, para predição e análise de dados?; H9_F: esta empresa utiliza tecnologias de inteligência artificial para: automatização 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?

³ A não consideração da variável H3_A se dá pelo fato de seu uso estar muito relacionado ao setor industrial.

Para as variáveis entre D11 e H9_AGREG, conforme quadro 4, as possibilidades de resposta incluíram: 0 = “Não”; 1 = “Sim”; 97 = “Não sabe”; 98 = “Não respondeu” e 99 = “Não se aplica”.

3.2 Modelagem paramétrica

Neste trabalho, para avaliar os determinantes da adoção de tecnologias 4.0 em empresas brasileiras, parte-se inicialmente de um modelo logit simples, o qual é ampliado em um modelo linear generalizado para abarcar a utilização de uma variável dependente categórica com limite superior definido. Ainda, utiliza-se um modelo não paramétrico de árvores de decisão para critérios comparativos.

No modelo logit, a partir do qual são testados os determinantes da adoção de cada uma das tecnologias 4.0 individualmente, há a pressuposição de que a variável dependente seja binária, no caso, a adoção ou não de determinada tecnologia 4.0.

Conforme Gujarati e Porter (2009), a função de distribuição logística é dada por:

$$P_i = \frac{e^{Z_i}}{1 + e^{Z_i}} \quad (1)$$

Em que $Z_i = \beta_1 + \beta_2 X_i$, X_i é o conjunto de variáveis explicativas, β_i o conjunto de coeficientes e P_i a probabilidade de ocorrência do evento estudado, que varia entre 0 e 1.

Dado que $1 - P_i = \frac{1}{1 + e^{Z_i}}$, é possível escrever $\frac{P_i}{1 - P_i} = e^{Z_i}$, onde $\frac{P_i}{1 - P_i}$ é a razão entre as probabilidades de ocorrência e não ocorrência do evento. O modelo logit, L , será:

$$L_i = \ln\left(\frac{P_i}{1 - P_i}\right) = Z_i = \beta_1 + \beta_2 X_i \quad (2)$$

A probabilidade de ocorrência do evento não é diretamente observável, mas a variável dependente Y_i , sim, e assume 1 caso a tecnologia seja adotada e 0 em caso contrário. Dessa forma, considerando que Y_i é uma variável aleatória de Bernoulli, é possível escrever $\Pr(Y_i = 1) = P_i$ e $\Pr(Y_i = 0) = (1 - P_i)$. Supondo uma amostra aleatória com n observações, a probabilidade conjunta de observar os n valores da variável dependente pode ser descrita pela função de verossimilhança linearizada (LLF):

$$LLF = \ln f(Y_1, Y_2, \dots, Y_n) = \sum_1^n Y_i(\beta_1 + \beta_2 X_i) - \sum_1^n \ln(1 + e^{(\beta_1 + \beta_2 X_i)}) \quad (3)$$

Em que $\beta_1 + \beta_2 X_i = \ln\left(\frac{P_i}{1-P_i}\right)$. As estimativas dos parâmetros são obtidas por meio da maximização da função de verossimilhança, porém os coeficientes do modelo logit não tem interpretação direta quando estimados, diferentemente dos modelos de regressão linear. Para que seja possível a interpretação é preciso calcular os efeitos marginais das variáveis aleatórias X_i , as quais refletem a mudança na probabilidade de ocorrência do evento associada a mudanças em X_i , mantendo as outras variáveis constantes $\left(\frac{\partial P_i}{\partial X_i}\right)$. Assim, o efeito marginal no modelo logit será dado por $\beta_j P_i (1 - P_i)$, onde β_j é o coeficiente da regressão parcial do j -ésimo regressor.

O modelo econométrico a ser estimado assumirá a forma:

$$Tec4.0_i = \ln\left(\frac{P_i}{1-P_i}\right) = \alpha + \beta_1.seguran\alpha_i + \beta_2.porte_i + \beta_3.regi\alpha_o_i + \beta_4.CNAE_i + u_i \quad (4)$$

Em que $Tec4.0$ é a variável dependente e refere-se à tecnologia 4.0 passível de adoção pela empresa; segurança, porte, região e CNAE são as variáveis categóricas explicativas referentes à posse de política de segurança digital, quantidade de pessoas ocupadas, região de origem e respectivo CNAE de cada empresa.

Uma segunda abordagem envolve os determinantes da adoção de tecnologias 4.0 conforme a totalidade das tecnologias existentes em cada empresa, ou seja, a variável dependente passa a ser dada pela soma de todas as tecnologias adotadas por cada empresa, $Ind4.0$, podendo variar de 0 a 6,³¹ enquanto as variáveis explicativas são mantidas.

Embora a variável dependente $Ind4.0$ aparente ser referente à contagem de tecnologias 4.0 adotadas por cada empresa, a sua natureza propriamente dita não é de uma variável de contagem – isto é, com limite superior indefinido. Nesse caso, ela é dada pela soma de variáveis binárias com valores mínimo e máximo predeterminados pela quantidade de tecnologias escolhidas para representar a indústria 4.0.

Segundo Wooldridge (2010), modelos de regressão binomial são adequados para casos nos quais deseja-se analisar dados de contagem condicionais a um limite superior conhecido. De acordo com o autor, sendo x_i um conjunto de variáveis exógenas, assume-se que y_i dado (n_i, x_i) tem distribuição binomial, denotada por $[n_i, p(x_i, \beta)]$, onde $p(x_i, \beta)$ é uma função limitada entre 0 e 1 – usualmente y_i é visto como a soma de n_i variáveis aleatórias independentes de Bernoulli (0 ou 1) e $p(x_i, \beta)$ é a probabilidade (condicional) de sucesso em cada tentativa. Tipicamente, $p(x_i, \beta) = G(x_i, \beta)$, onde $G(\cdot)$ é uma função de distribuição cumulativa como a função logística ou a normal padrão. Dado um modelo paramétrico $p(x, \beta)$, o estimador de quasi máxima verossimilhança é obtido pela maximização da soma da *binomial quasi-log likelihood* de cada observação i .

31. A variável que compreende robôs industriais não é considerada por ter sua aplicação notadamente restrita ao setor industrial.

A opção então dá-se pelo modelo linear generalizado com distribuição binomial e função de ligação logit, a qual assume a forma semelhante à da equação (4).

$$\text{Ind4.0}_i = \ln\left(\frac{P_i}{1-P_i}\right) = \alpha + \beta_1 \cdot \text{segurança}_i + \beta_2 \cdot \text{porte}_i + \beta_3 \cdot \text{região}_i + \beta_4 \cdot \text{CNAE}_i + u_i \quad (5)$$

As mudanças ocorrem na forma como a estimação é feita no *software* econométrico, com a introdução do parâmetro a , o qual denota o valor máximo de I4.0 (6), e a determinação quanto à distribuição binomial. A descrição do código no *software* Stata é conforme segue:

$$\text{glm Ind4.0 segurança porte região CNAE, family(binomial } a) \text{ link(logit)} \quad (6)$$

A interpretação é dada por um modelo logit de *Ind4.0* eventos ocorrendo em a tentativas como uma função das variáveis explicativas. A estimação é feita a partir de um estimador de máxima verossimilhança.

3.3 Modelagem não paramétrica: árvores de decisão

A estimação não paramétrica é realizada por meio de árvores de inferência condicional – “uma classe não paramétrica de árvores de regressão incorporando modelos de regressão estruturados em árvore em uma teoria bem definida de procedimentos de inferência condicional” (p. 1), as quais podem ser aplicadas a problemas variados incluindo aqueles com variáveis dependentes ordinais.³²

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 da combinação de decisões ou eventos. Por sua vez, os galhos representam resultados ou ocorrências que se desdobram dos nós raízes e dos 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).³³

32. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/partykit/vignettes/ctree.pdf>.

33. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/partykit/partykit.pdf>.

4 RESULTADOS

Um desafio para a avaliação em relação aos determinantes da utilização de tecnologias 4.0 por meio da pesquisa TIC Empresas 2021 refere-se ao fato de que as perguntas do módulo H (novas tecnologias) são feitas exclusivamente às companhias que informaram possuir área de TI – 44% da totalidade das organizações. Segundo o relatório do levantamento, isso se dá com base no conhecimento prévio sobre a maior complexidade desse tipo de empresa em relação às demais que compõem a amostra da pesquisa.

Essa peculiaridade relacionada às perguntas sobre novas tecnologias dificulta o trabalho de estimações econométricas ao gerar possível viés, de duas formas: i) quando da utilização da amostra completa – para manter os devidos pesos amostrais, os resultados seriam subestimados, dado que o questionamento quanto à adoção das tecnologias 4.0 não foi feito a 56% das empresas; e ii) quando da utilização da amostra contendo apenas as companhias possuidoras de setor de TI, o emprego dos pesos amostrais – calculados com base na totalidade das empresas – deixa de ponderar corretamente as observações.

Para tentar contornar tais adversidades, serão trabalhados três conjuntos de dados na análise econométrica, o primeiro deles contendo a amostra completa, com os respectivos pesos amostrais, e os dois complementares compostos apenas pelas empresas com setor de TI, um deles mantendo a aplicação dos pesos amostrais e o outro desconsiderando possíveis ponderações.

As tabelas 1 e 2 ilustram a composição das amostras supramencionadas para as variáveis binárias e categóricas, respectivamente.

TABELA 1
Estatísticas descritivas para variáveis binárias

Tecnologia	Resposta	Amostra completa		TI com peso		TI sem peso	
		Número	%	Número	%	Número	%
Processamento em nuvem	0	2.747	67,6	1.301	55,89	1.262	54,21
	1	1.147	28,22	952	40,9	1.005	43,17
	97-99	170	4,17	75	3,21	61	2,62
<i>Big data</i>	0	1.529	37,63	1.996	85,74	1.925	82,69
	1	254	6,26	332	14,26	403	17,31
	97-99	2.280	56,11	0	0	0	0
Robôs industriais	0	1.669	41,07	2.179	93,58	2.159	92,74
	1	92	2,25	120	5,14	136	5,84
	97-99	2.303	56,67	30	1,29	33	1,41

(Continua)

(Continuação)

Tecnologia	Resposta	Amostra completa		TI com peso		TI sem peso	
		Número	%	Número	%	Número	%
Robôs de serviço	0	1.725	42,46	2.252	96,74	2.235	96,01
	1	54	1,32	70	3,02	79	3,39
	97-99	2.285	56,22	6	0,25	14	0,6
Impressão em 3D	0	1.695	41,7	2.212	95,01	2.198	94,42
	1	89	2,19	116	4,99	130	5,58
	97-99	2.280	56,11	0	0	0	0
IoT	0	1.180	29,04	1.540	66,17	1.503	64,56
	1	586	14,41	764	32,83	796	34,19
	97-99	2.298	56,55	23	1,01	29	1,25
IA	0	3.539	87,09	1.643	70,59	1.551	66,62
	1	525	12,91	685	29,41	777	33,38
	97-99	0	0	0	0	0	0
Política de segurança digital	0	1.885	46,39	582	25,02	474	20,36
	1	1.986	48,86	1.627	69,87	1.794	77,06
	97-99	193	4,76	119	5,11	60	2,58

Fonte: CGI.Br (2022).
Elaboração dos autores.

Para calcular a quantidade de tecnologias 4.0 adotadas por cada empresa, e posteriormente para utilização de cada uma delas como variável dependente em modelos logit, as respostas de números 97, 98 e 99 foram substituídas por 0.

Para fins comparativos, em países da OCDE (Lange, Montagnier e Phillips, 2023), em média 45% das empresas usam computação em nuvem, 25% usam tecnologias IoT, 13% usam análise de *big data* e 7% usam IA. Nas empresas brasileiras, entre as tecnologias 4.0, o processamento em nuvem também lidera a adoção, conforme a tabela 1, porém com menos de 30%. Para as demais tecnologias, IoT e IA têm magnitudes parecidas, enquanto *big data* tem números pouco expressivos.

TABELA 2
Estatísticas descritivas para variáveis categóricas

Variável	Resposta	Amostra completa		TI com peso		TI sem peso	
		Número	%	Número	%	Número	%
Região	Norte	177	4,3	116	5,0	294	12,6
	Nordeste	623	15,3	351	15,1	333	14,3
	Sudeste	2.076	51,1	1.200	51,6	993	42,7
	Sul	856	21,1	446	19,2	412	17,7
	Centro-Oeste	332	8,2	215	9,2	296	12,7
CNAE	Indústria	789	19,4	414	17,8	393	16,9
	Construção	278	6,9	118	5,1	196	8,4
	Comércio	1.563	38,5	909	39,0	603	25,9
	Transporte	232	5,7	151	6,5	249	10,7
	Alojamento e alimentação	454	11,2	197	8,4	180	7,7
	Informação e comunicação	112	2,8	119	5,1	301	12,9
	Atividades imobiliárias, científicas e administrativas	532	13,1	364	15,6	234	10,1
Porte (pessoas ocupadas)	Artes, cultura e esportes	102	2,5	57	2,4	172	7,4
	10-49	3.564	87,7	1.854	79,7	1.127	48,4
	50-249	413	10,2	373	16,0	728	31,3
Ind4.0	250 ou mais	86	2,1	100	4,3	473	20,3
	0	2.465	60,6	785	33,7	710	30,5
	1	959	23,6	708	30,4	683	29,3
	2	338	8,3	441	18,9	486	20,9
	3	209	5,1	272	11,7	293	12,6
	4	75	1,9	98	4,2	127	5,5
	5	17	0,4	23	1,0	26	1,1
	6	1	0	1	0,1	3	0,1

Fonte: CGI.Br (2022).
Elaboração dos autores.

A tabela 2 realça diferenças expressivas entre os três conjuntos amostrais, principalmente entre a amostra completa e a amostra apenas com TI sem ponderação. Entre as alterações centrais, é possível destacar a perda de participação da região Sudeste e o ganho das regiões Norte e Centro-Oeste, além do forte aumento na porcentagem de médias e grandes empresas – nas quais a taxa de resposta ao questionário costuma ser maior. Ainda, há maior intensidade na participação dos CNAEs 4, 6 e 8, e diminuição nos CNAEs 3, 5 e 7. Por fim, com relação à soma das tecnologias 4.0, a restrição da amostra para empresas com setor de TI faz

crescer a participação de empresas que adotam uma ou mais tecnologias 4.0 – por exemplo, a porcentagem de empresas que adotam uma, duas e três tecnologias chega a saltar, respectivamente, de 23,6%, 8,3% e 5,1% para 29,3%, 20,9% e 12,6%, enquanto a proporção de empresas sem adoção das tecnologias cai de 60,6% para 30,5%.

As estimações econométricas são realizadas para os três conjuntos amostrais descritos anteriormente. De início, aplica-se um modelo linear generalizado tendo como variável dependente *Ind4.0*, conforme a tabela 2. Em seguida, cada uma das tecnologias 4.0 é colocada como variável dependente e seus determinantes são estimados por meio de modelos logit.³⁴ Por fim, utiliza-se de modelagem não paramétrica – árvores de decisão – para comparação com alguns dos resultados obtidos nas regressões paramétricas. Os modelos paramétricos foram estimados por meio do *software* Stata, e os não paramétricos por meio do *software* R.

As tabelas adiante apresentam os resultados para as diversas estimações. A numeração das colunas é referente a mudanças na base de dados utilizada, conforme se descreve:

- 1 e 2: amostra completa com a utilização de pesos para ponderar cada observação;
- 3 e 4: amostra reduzida com a utilização de pesos para ponderar cada observação; e
- 5 e 6: amostra reduzida sem a utilização de pesos.

A amostra reduzida é obtida mantendo-se apenas as empresas que respondem ter “uma área ou departamento de tecnologia da informação, TI, responsável, por exemplo, por sistemas, redes, desenvolvimentos e suporte”.

A tabela 3 apresenta os resultados do modelo linear generalizado, tendo como variável dependente a soma de seis tecnologias 4.0.³⁵ Os coeficientes apresentados referem-se aos efeitos parciais médios de cada uma das variáveis explicativas sobre a média da variável dependente.³⁶

34. As tecnologias robôs de serviço e impressão em 3D não apresentam modelos válidos, portanto seus resultados são omitidos. Por meio da análise descritiva, é possível perceber que a adoção de ambas é ainda muito baixa entre as empresas brasileiras.

35. Processamento em nuvem, *big data*, robôs de serviço, impressão em 3D, IoT e IA.

36. Foram feitas simulações incluindo também uma variável explicativa associada a parâmetros de conectividade das empresas – e.g. “b4a_31: nos últimos doze meses, qual a velocidade máxima para *download* contratada para conexão via fibra ótica?”. Porém, tendo em vista que os resultados sofreram poucas alterações, além do possível risco de endogeneidade entre conectividade e tecnologias como computação em nuvem e IoT, optou-se por não manter tal variável na modelagem.

TABELA 3
Modelo linear generalizado dos determinantes da adoção de tecnologias 4.0

	Variável dependente: soma das tecnologias 4.0					
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Segurança digital	0.819*** (0.06)		0.887*** (0.10)		0.855*** (0.07)	
Região						
Nordeste	-0.114 (0.07)	-0.076 (0.08)	-0.069 (0.12)	-0.007 (0.13)	-0.014 (0.10)	0.043 (0.10)
Sudeste	-0.142* (0.06)	-0.112 (0.06)	-0.139 (0.10)	-0.070 (0.11)	-0.113 (0.08)	-0.055 (0.09)
Sul	-0.119 (0.07)	-0.093 (0.07)	0.054 (0.13)	0.098 (0.13)	-0.031 (0.10)	0.039 (0.10)
Centro-Oeste	-0.047 (0.08)	0.022 (0.09)	-0.015 (0.14)	0.073 (0.14)	0.025 (0.10)	0.065 (0.10)
Porte (pessoas ocupadas)						
50-249	0.166*** (0.04)	0.382*** (0.05)	-0.001 (0.07)	0.139 (0.07)	0.065 (0.06)	0.181** (0.06)
250 ou mais	0.446*** (0.06)	0.897*** (0.07)	0.253** (0.08)	0.475*** (0.09)	0.285*** (0.07)	0.470*** (0.08)
Mercado de atuação						
Construção	-0.018 (0.06)	-0.087 (0.06)	0.026 (0.12)	-0.020 (0.12)	-0.013 (0.11)	-0.044 (0.11)
Comércio	0.016 (0.06)	0.022 (0.06)	-0.039 (0.11)	-0.027 (0.12)	-0.075 (0.08)	-0.063 (0.08)
Transporte	0.094 (0.07)	0.103 (0.07)	0.022 (0.12)	0.030 (0.13)	0.098 (0.10)	0.096 (0.10)
Alojamento e alimentação	-0.104 (0.07)	-0.175** (0.07)	-0.183 (0.15)	-0.276 (0.15)	-0.276* (0.11)	-0.351** (0.11)
Informação e comunicação	0.459*** (0.07)	0.761*** (0.08)	0.299** (0.11)	0.419*** (0.11)	0.353*** (0.10)	0.451*** (0.10)
Atividades imobiliárias, científicas e administrativas	0.099 (0.07)	0.234** (0.08)	0.103 (0.12)	0.241 (0.13)	0.070 (0.10)	0.139 (0.10)
Artes, cultura e esportes	0.034 (0.06)	0.060 (0.07)	-0.038 (0.12)	-0.004 (0.13)	0.012 (0.11)	0.032 (0.12)
Número de empresas	4.064	4.064	2.328	2.328	2.328	2.328
Especificação (<i>linktest</i>)	Ok	-	-	-	Ok	Ok
LRT (GOF)	657.211***	781.167***	345.377***	374.759***	3.705***	3.920***

Fonte: CGI.BR (2022).
Elaboração dos autores.
Obs.: *** 0,1%; ** 1%; * 5%.

Dada a particularidade de construção da variável dependente, obtida pela soma de variáveis binárias representando tecnologias 4.0 individuais, o Stata não apresenta testes de qualidade de ajuste (GOF) concernentes a esse contexto. Recorre-se então ao teste proposto em Bellocco e Algeri (2013), aplicável a modelos lineares envolvendo regressores categóricos, que implementa um teste da razão de verossimilhança (LRT) baseado em estatísticas de desvio – ele compara, em termos de verossimilhança, o modelo sendo ajustado com o modelo saturado.³⁷ A rejeição da hipótese nula em todos os casos implica que os modelos não são tão bons quanto os respectivos modelos saturados.

Os resultados indicam, de forma geral, a relevância da segurança digital, das grandes empresas e do mercado de informação e comunicação como determinantes de maior adoção de tecnologias 4.0. Em termos de magnitude, quando inserida no modelo, a variável de segurança digital apresentou o maior coeficiente, enquanto grandes empresas e de CNAE 6 tiveram ordens de grandeza semelhantes. Sem a utilização de segurança digital, apenas o modelo 6 foi válido e trouxe significância adicional para o mercado de alojamento e alimentação, com influência negativa, quando comparada ao valor base (industrial), na aplicação das tecnologias 4.0.

Como forma de avaliação mais detalhada, procede-se com a estimação dos mesmos determinantes para cada uma das tecnologias 4.0 individualmente. Para tanto, utiliza-se um modelo logit, no qual a variável dependente refere-se à adoção ou não da respectiva tecnologia em cada uma das configurações de amostra e variáveis explicativas. As tabelas 4 a 8 exibem os resultados.³⁸

As estimativas referem-se aos efeitos marginais médios das respectivas variáveis independentes binárias sobre a probabilidade esperada de a variável dependente (tecnologia 4.0) ser adotada, ou seja, assumir o valor unitário. Como todos os regressores são binários, omite-se uma categoria de cada grupo de variáveis que contemplam múltiplas categorias – região Norte, empresas pequenas e CNAE do setor industrial. Dentro de cada grupo, os efeitos marginais médios têm como base comparativa a categoria omitida na apresentação dos resultados.

A tabela 4 mostra os resultados para os determinantes da utilização de capacidade de processamento de nuvem pelas empresas.

37. É possível pensar no modelo saturado como aquele que leva à previsão perfeita do resultado e representa o maior modelo passível de ajuste – *i.e.*, é utilizado como referência para avaliação da adequação de qualquer outro modelo de interesse (Bellocco e Algeri, 2013).

38. Os testes Pearson de qualidade do ajuste no Stata só são passíveis de aplicação a estimações feitas sem a utilização de pesos amostrais. Nesse caso, os valores mostrados para os testes Pearson (GOF) nas amostras (1) e (2) são referentes às regressões estimadas sem a utilização de pesos, embora os coeficientes das variáveis explicativas tenham sido estimados com os pesos amostrais.

TABELA 4
Modelo logit dos determinantes da adoção de processamento em nuvem

	Variável dependente: adoção de processamento em nuvem					
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Segurança digital	0.272*** (0.02)		0.246*** (0.04)		0.235*** (0.03)	
Região						
Nordeste	-0.025 (0.04)	-0.013 (0.04)	0.008 (0.06)	0.026 (0.06)	0.015 (0.04)	0.031 (0.04)
Sudeste	-0.016 (0.03)	-0.007 (0.03)	0.054 (0.04)	0.074 (0.04)	0.053 (0.03)	0.069* (0.03)
Sul	-0.025 (0.03)	-0.018 (0.03)	0.079 (0.05)	0.090 (0.05)	0.041 (0.04)	0.060 (0.04)
Centro-Oeste	-0.025 (0.04)	-0.003 (0.04)	-0.005 (0.06)	0.019 (0.06)	0.056 (0.04)	0.066 (0.04)
Porte (pessoas ocupadas)						
50-249	0.026 (0.02)	0.099*** (0.02)	0.002 (0.03)	0.044 (0.03)	0.025 (0.02)	0.061* (0.02)
250 ou mais	0.066** (0.02)	0.195*** (0.03)	0.032 (0.03)	0.092** (0.03)	0.058* (0.03)	0.111*** (0.03)
Mercado de atuação						
Construção	0.029 (0.03)	0.000 (0.03)	0.054 (0.06)	0.037 (0.05)	0.050 (0.04)	0.039 (0.04)
Comércio	-0.013 (0.03)	-0.010 (0.03)	0.019 (0.05)	0.020 (0.05)	0.012 (0.03)	0.014 (0.03)
Transporte	0.038 (0.03)	0.043 (0.03)	0.033 (0.05)	0.034 (0.05)	0.060 (0.04)	0.060 (0.04)
Alojamento e alimentação	-0.048 (0.03)	-0.075* (0.03)	-0.062 (0.06)	-0.091 (0.06)	-0.073 (0.04)	-0.097* (0.04)
Informação e comunicação	0.130*** (0.03)	0.223*** (0.04)	0.116* (0.05)	0.149** (0.05)	0.142*** (0.04)	0.168*** (0.04)
Atividades imobiliárias, científicas e administrativas	0.072* (0.03)	0.130*** (0.04)	0.137** (0.05)	0.179*** (0.05)	0.105** (0.04)	0.127** (0.04)
Artes, cultura e esportes	0.020 (0.03)	0.031 (0.03)	0.014 (0.05)	0.023 (0.05)	0.055 (0.05)	0.060 (0.05)
Número de empresas	4.064	4.064	2.328	2.328	2.328	2.328
Especificação (<i>linktest</i>)	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok
Pearson (GOF)	215.24	107.36			225.04	115.55

Fonte: CGI.BR (2022).
Elaboração dos autores.
Obs.: *** 0,1%; ** 1%; * 5%.

As variáveis mais significativas do modelo são a existência de política de segurança digital, porte de grande empresa e pertencimento aos mercados de informação e comunicação, e atividades imobiliárias, profissionais, científicas, técnicas, administrativas e de serviços complementares. A título de exemplo, no modelo (1), dispor de uma política de segurança digital aumenta a probabilidade de adoção de processamento em nuvem em aproximadamente 27% em empresas quando comparado a não ter. De forma complementar, o fato de uma empresa ter 250 ou mais funcionários eleva de 6% a 20%, a depender do modelo, a probabilidade de pagamento por serviço de capacidade de processamento em nuvem em comparação a empresas de até 50 funcionários.

Os resultados quanto aos fatores que impactam a utilização de análises de *big data* são apresentados na tabela 5. Nesse caso, apenas os modelos (1) e (6) são válidos se considerado o teste de especificação a 5%. Observando 10%, o modelo (2) também passa a ser válido.

TABELA 5
Modelo logit dos determinantes da adoção de análises de *big data*

	Variável dependente: adoção de análises de <i>big data</i>					
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Segurança digital	0.150*** (0.02)		0.235*** (0.04)		0.231*** (0.03)	
Região						
Nordeste	-0.008 (0.02)	-0.003 (0.02)	-0.006 (0.04)	0.008 (0.04)	0.019 (0.03)	0.034 (0.03)
Sudeste	-0.001 (0.01)	0.002 (0.01)	0.000 (0.03)	0.016 (0.03)	-0.011 (0.03)	0.003 (0.03)
Sul	0.005 (0.02)	0.008 (0.02)	0.033 (0.04)	0.043 (0.03)	0.023 (0.03)	0.039 (0.03)
Centro-Oeste	0.008 (0.02)	0.018 (0.02)	0.015 (0.04)	0.035 (0.04)	0.021 (0.03)	0.030 (0.03)
Porte (pessoas ocupadas)						
50-249	0.031** (0.01)	0.069*** (0.01)	0.014 (0.02)	0.045* (0.02)	0.029 (0.02)	0.053** (0.02)
250 ou mais	0.070*** (0.01)	0.156*** (0.02)	0.052* (0.02)	0.104*** (0.03)	0.070** (0.02)	0.113*** (0.02)
Mercado de atuação						
Construção	-0.025 (0.01)	-0.031* (0.01)	-0.053 (0.04)	-0.061 (0.04)	-0.061* (0.03)	-0.067* (0.03)

(Continua)

(Continuação)

	Variável dependente: adoção de análises de <i>big data</i>					
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Mercado de atuação						
Comércio	0.007 (0.02)	0.008 (0.02)	-0.008 (0.04)	-0.008 (0.04)	0.006 (0.02)	0.007 (0.02)
Transporte	0.031 (0.02)	0.032 (0.02)	0.045 (0.04)	0.045 (0.04)	0.062* (0.03)	0.061 (0.03)
Alojamento e alimentação	-0.035* (0.01)	-0.040** (0.01)	-0.082* (0.04)	-0.094** (0.03)	-0.048 (0.03)	-0.063* (0.03)
Informação e comunicação	0.045** (0.02)	0.091*** (0.02)	0.016 (0.03)	0.040 (0.04)	0.031 (0.03)	0.051 (0.03)
Atividades imobiliárias, científicas e administrativas	-0.022 (0.01)	-0.011 (0.02)	-0.068* (0.03)	-0.051 (0.04)	-0.053 (0.03)	-0.043 (0.03)
Artes, cultura e esportes	-0.014 (0.02)	-0.011 (0.02)	-0.049 (0.04)	-0.044 (0.04)	-0.043 (0.03)	-0.039 (0.03)
Número de empresas	4.064	4.064	2.328	2.328	2.328	2.328
Especificação (<i>linktest</i>)	Ok	-10%	-10%	-	Ok	Ok
Pearson (GOF)	241.68*	121.25			236.21*	123.65

Fonte: CGI.BR (2022).

Elaboração dos autores.

Obs.: *** 0,1%; ** 1%; * 5%.

Comum aos modelos (1), (2) e (6), a execução de análises de *big data* é influenciada pelo porte da empresa – as médias e grandes têm maior probabilidade de adoção, em relação às pequenas –, e negativamente pelo setor de alojamento e alimentação, no qual as probabilidades são de 3% a 6% menores em comparação ao setor industrial. Novamente, a presença de uma política de segurança digital é responsável pelo coeficiente de maior magnitude a influenciar positivamente a probabilidade de utilização de *big data*.

A tabela 6 é referente aos resultados para o emprego de robôs industriais, os quais validam apenas os modelos (5) e (6). Nesse cenário, o destaque quanto aos principais determinantes relaciona-se ao mercado de atuação das empresas. Como a categoria omitida na variável CNAE é justamente a do setor industrial, todas as outras são negativas e estatisticamente significativas, realçando que a utilização de robôs industriais é particularmente presente na indústria de transformação. Ainda, a presença de política de segurança digital também eleva ligeiramente a probabilidade de adoção de robôs industriais, enquanto a sua retirada do modelo torna significativa a variável de grandes empresas, também positiva e de baixa magnitude.

TABELA 6
Modelo logit dos determinantes da adoção de robôs industriais

	Variável dependente: adoção de robôs industriais					
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Segurança digital	0.033*** (0.01)		0.037* (0.02)		0.034* (0.01)	
Região						
Nordeste	-0.004 (0.01)	-0.003 (0.01)	-0.003 (0.02)	-0.001 (0.02)	-0.002 (0.02)	-0.000 (0.02)
Sudeste	0.001 (0.01)	0.002 (0.01)	0.007 (0.02)	0.008 (0.02)	-0.001 (0.02)	0.001 (0.02)
Sul	-0.005 (0.01)	-0.004 (0.01)	-0.001 (0.02)	0.001 (0.02)	-0.004 (0.02)	-0.001 (0.02)
Centro-Oeste	0.019 (0.02)	0.021 (0.02)	0.044 (0.03)	0.049 (0.04)	-0.000 (0.02)	0.002 (0.02)
Porte (pessoas ocupadas)						
50-249	0.012 (0.01)	0.023** (0.01)	-0.002 (0.01)	0.004 (0.01)	-0.000 (0.01)	0.004 (0.01)
250 ou mais	0.040*** (0.01)	0.073*** (0.01)	0.032* (0.02)	0.046** (0.02)	0.025 (0.01)	0.033* (0.01)
Mercado de atuação						
Construção	-0.051*** (0.01)	-0.051*** (0.01)	-0.129*** (0.03)	-0.129*** (0.03)	-0.160*** (0.02)	-0.159*** (0.02)
Comércio	-0.044*** (0.01)	-0.042*** (0.01)	-0.119*** (0.03)	-0.117*** (0.03)	-0.151*** (0.02)	-0.150*** (0.02)
Transporte	-0.042*** (0.01)	-0.041*** (0.01)	-0.115*** (0.03)	-0.114*** (0.03)	-0.151*** (0.02)	-0.150*** (0.02)
Alojamento e alimentação	-0.039** (0.01)	-0.040** (0.01)	-0.100** (0.04)	-0.103** (0.03)	-0.153*** (0.02)	-0.154*** (0.02)
Informação e comunicação	-0.049*** (0.01)	-0.044*** (0.01)	-0.135*** (0.03)	-0.132*** (0.03)	-0.164*** (0.02)	-0.162*** (0.02)
Atividades imobiliárias, científicas e administrativas	-0.051*** (0.01)	-0.048*** (0.01)	-0.133*** (0.03)	-0.130*** (0.03)	-0.165*** (0.02)	-0.164*** (0.02)
Artes, cultura e esportes	-0.040*** (0.01)	-0.037** (0.01)	-0.108*** (0.03)	-0.105*** (0.03)	-0.133*** (0.03)	-0.132*** (0.03)
Número de empresas	4.064	4.064	2.328	2.328	2.328	2.328
Especificação (<i>linktest</i>)	-	-	-	-	Ok	Ok
Pearson (GOF)	228.07	99.53			210.56	94.80

Fonte: CGI.BR (2022).
Elaboração dos autores.
Obs.: *** 0,1%; ** 1%; * 5%.

A IoT como variável dependente é exposta na tabela 7. Ao nível de significância de 10%, validam-se os modelos (2), (4), (5) e (6).

TABELA 7
Modelo logit dos determinantes da adoção de IoT

	Variável dependente: adoção de IoT					
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Segurança digital	0.170*** (0.02)		0.163*** (0.04)		0.157*** (0.02)	
Região						
Nordeste	-0.005 (0.03)	0.003 (0.03)	0.038 (0.06)	0.051 (0.06)	-0.009 (0.04)	0.004 (0.04)
Sudeste	-0.066** (0.02)	-0.060** (0.02)	-0.108** (0.04)	-0.093* (0.04)	-0.118*** (0.03)	-0.106** (0.03)
Sul	-0.031 (0.03)	-0.026 (0.03)	0.000 (0.05)	0.008 (0.05)	-0.047 (0.04)	-0.033 (0.04)
Centro-Oeste	0.005 (0.03)	0.024 (0.04)	0.025 (0.06)	0.044 (0.06)	-0.051 (0.04)	-0.042 (0.04)
Porte (pessoas ocupadas)						
50 - 249	0.042** (0.02)	0.089*** (0.02)	-0.024 (0.03)	0.001 (0.03)	0.007 (0.02)	0.029 (0.02)
250 ou mais	0.122*** (0.02)	0.224*** (0.03)	0.042 (0.03)	0.082* (0.03)	0.041 (0.03)	0.076** (0.03)
Mercado de atuação						
Construção	-0.003 (0.02)	-0.016 (0.02)	0.023 (0.05)	0.012 (0.05)	0.009 (0.04)	0.002 (0.04)
Comércio	0.053* (0.02)	0.054* (0.02)	0.067 (0.04)	0.066 (0.05)	0.020 (0.03)	0.021 (0.03)
Transporte	0.019 (0.02)	0.019 (0.02)	-0.006 (0.05)	-0.006 (0.05)	-0.001 (0.04)	-0.002 (0.04)
Alojamento e alimentação	0.032 (0.03)	0.012 (0.02)	0.076 (0.06)	0.052 (0.06)	0.048 (0.04)	0.028 (0.04)
Informação e comunicação	0.177*** (0.03)	0.248*** (0.03)	0.151*** (0.04)	0.171*** (0.04)	0.162*** (0.04)	0.179*** (0.04)
Atividades imobiliárias, científicas e administrativas	0.041 (0.02)	0.066* (0.03)	0.054 (0.05)	0.077 (0.05)	0.040 (0.04)	0.053 (0.04)
Artes, cultura e esportes	0.046 (0.02)	0.051* (0.02)	0.068 (0.05)	0.072 (0.05)	0.073 (0.04)	0.076 (0.04)
Número de empresas	4.064	4.064	2.328	2.328	2.328	2.328
Especificação (<i>linktest</i>)	-	Ok	-	-10%	Ok	-10%
Pearson (GOF)	191.63	106.05			182.73	94.38

Fonte: CGI.BR (2022).

Elaboração dos autores.

Obs.: *** 0,1%; ** 1%; * 5%.

Os resultados comuns aos quatro modelos são a significância estatística do CNAE 6, o qual aumenta a probabilidade de utilização de dispositivos ou sistemas interconectados em valores da ordem de 15% a 25%, em comparação ao setor industrial, e a região Sudeste, na qual o impacto na probabilidade assume valores negativos, tendo o Norte como base de comparação. A depender da amostra, segurança digital e empresas médias e grandes também podem elevar a probabilidade de existir IoT nas empresas brasileiras.

Por fim, a tabela 8 traz os determinantes para a adoção em empresas brasileiras de tecnologias que abarcam IA.³⁹ Os modelos válidos, de acordo com os testes de especificação e ajuste de medida a 10% de significância estatística, são: (1), (2), (5) e (6).

TABELA 8
Modelo logit dos determinantes da adoção de IA

	Variável dependente: IA					
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Segurança digital	0.182*** (0.02)		0.210*** (0.04)		0.179*** (0.03)	
Região						
Nordeste	-0.058* (0.03)	-0.048 (0.03)	-0.080 (0.05)	-0.063 (0.05)	-0.020 (0.04)	-0.006 (0.04)
Sudeste	-0.041 (0.02)	-0.032 (0.02)	-0.059 (0.04)	-0.041 (0.04)	-0.027 (0.03)	-0.014 (0.03)
Sul	-0.055* (0.02)	-0.047* (0.02)	-0.056 (0.05)	-0.043 (0.05)	-0.031 (0.04)	-0.016 (0.04)
Centro-Oeste	-0.041 (0.03)	-0.027 (0.03)	-0.070 (0.05)	-0.049 (0.05)	0.010 (0.04)	0.018 (0.04)
Porte (pessoas ocupadas)						
50-249	0.048** (0.01)	0.098*** (0.02)	-0.002 (0.03)	0.031 (0.03)	0.007 (0.02)	0.032 (0.02)
250 ou mais	0.132*** (0.02)	0.245*** (0.02)	0.077* (0.03)	0.130*** (0.03)	0.080** (0.03)	0.120*** (0.03)
Mercado de atuação						
Construção	-0.004 (0.02)	-0.019 (0.02)	0.024 (0.05)	0.010 (0.05)	0.005 (0.04)	-0.003 (0.04)

(Continua)

39. Texto elaborado pelos autores com versão ligeiramente modificada do modelo que foi aprovado no 51º Encontro Nacional da Associação Nacional dos Centros de Pós-Graduação em Economia (Anpec). Disponível em: https://www.anpec.org.br/encontro/2023/submissao/files_1/19-78cd206a24f36dd6bff2bee24849a185.docx. Acesso em: 20 set. 2023.

(Continuação)

	Variável dependente: IA					
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Mercado de atuação						
Comércio	-0.006 (0.02)	-0.005 (0.02)	-0.057 (0.04)	-0.055 (0.04)	-0.026 (0.03)	-0.024 (0.03)
Transporte	0.028 (0.02)	0.031 (0.02)	0.014 (0.05)	0.014 (0.05)	0.056 (0.04)	0.055 (0.04)
Alojamento e alimentação	-0.036 (0.02)	-0.049* (0.02)	-0.081 (0.06)	-0.103 (0.05)	-0.111** (0.04)	-0.126** (0.04)
Informação e comunicação	0.120*** (0.03)	0.194*** (0.03)	0.067 (0.05)	0.095* (0.05)	0.081* (0.04)	0.101** (0.04)
Atividades imobiliárias, científicas e administrativas	0.033 (0.02)	0.065* (0.03)	0.031 (0.05)	0.065 (0.05)	0.040 (0.04)	0.055 (0.04)
Artes, cultura e esportes	0.015 (0.02)	0.021 (0.02)	0.003 (0.05)	0.010 (0.05)	0.012 (0.05)	0.015 (0.04)
Número de empresas	4.064	4.064	2.328	2.328	2.328	2.328
Especificação (<i>linktest</i>)	Ok	-10%	-	-	Ok	Ok
Pearson (GOF)	201.69	117.02			206.28	124.52

Fonte: CGI.BR (2022).

Elaboração dos autores.

Obs.: *** 0,1%; ** 1%; * 5%.

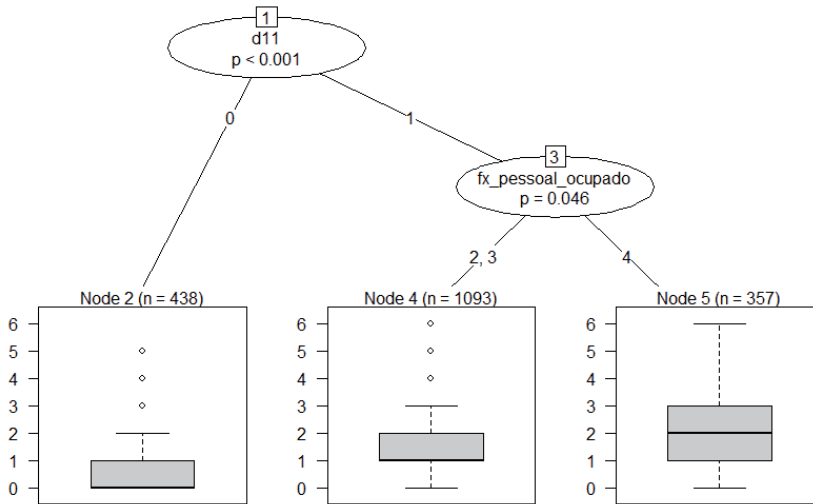
Os resultados significativos que se repetem nos quatro modelos válidos colocam três variáveis como mais relevantes para explicar a opção pelo uso de IA: a implementação de uma política de segurança digital, o porte das empresas com 250 ou mais pessoas ocupadas e o pertencimento ao CNAE de informação e comunicação. Esse conjunto de variáveis tem influência positiva sobre a variável dependente. A significância do setor de informação e comunicação apresenta semelhanças com o cenário de países da OCDE, nos quais a adoção da IA está concentrada nos serviços de informação e comunicação (Lange, Montagnier e Phillips, 2023).

4.1 Estimação não paramétrica

As figuras 3 e 4 ilustram os resultados das estimações não paramétricas. Enquanto a variável dependente é dada pela soma das tecnologias 4.0, as variáveis independentes compreendem região, porte, mercado de atuação (CNAE) e, apenas para a figura 3, política de segurança digital. A base de dados a partir da qual elas são realizadas refere-se às empresas com setor de TI e sem a utilização de pesos amostrais – há comparabilidade entre os resultados apresentados a seguir com aqueles das colunas (5) e (6) da tabela 3. A amostra foi particionada em 80% para teste e 20% para validação.

FIGURA 3

Estimação não paramétrica para determinantes de adoção de tecnologias 4.0: com segurança digital



Fonte: CGI.BR (2022).

Elaboração dos autores.

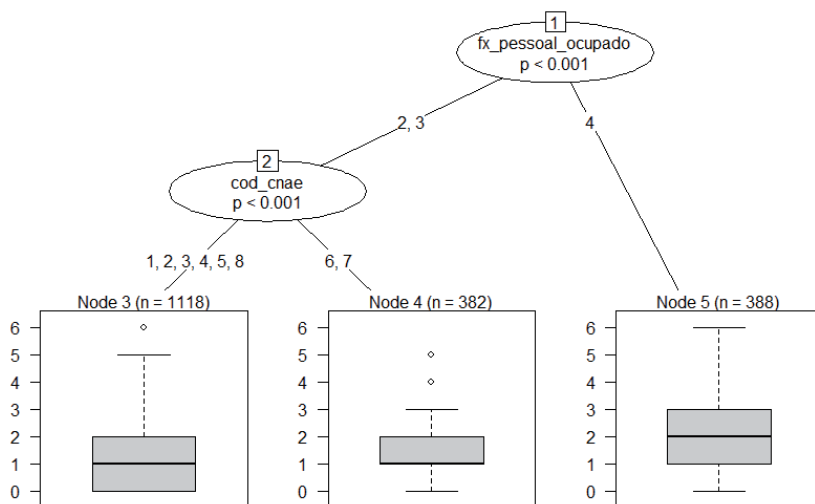
Obs.: Figura cujos leiaute e textos não puderam ser padronizados e revisados em virtude das condições técnicas dos originais (nota do Editorial).

A análise da figura 3 permite destacar a existência de política de segurança digital (d11) como a variável mais significativa – primeira divisão binária – para determinar a adoção de tecnologias 4.0, com significância estatística de 0,1%. O ramo com o valor nulo para a segurança digital já leva a um nó folha (2) composto por 438 empresas com baixa adoção de tecnologias 4.0 – mediana em 0 e quartis entre 0 e 2. O ramo com empresas que possuem política de segurança digital leva ao nó interno de porte da empresa (fx_pessoal_ocupado), significativo a 5%. A partir de então, a subdivisão é feita à esquerda por empresas pequenas e médias e à direita pelas grandes. Enquanto o nó folha 4, com 1.093 observações, indica adoção de tecnologias 4.0 mais elevada – mediana em 1 e quartis entre 0 e 3 – quando comparado ao nó folha 2, ela ainda é inferior àquela das grandes empresas, presentes no nó folha 5 com 357 elementos, os quais têm mediana na adoção de duas tecnologias 4.0 e quartis em todo o intervalo da escala.

No cenário da figura 3, as variáveis referentes à região e ao mercado de atuação das empresas não se mostraram estatisticamente significantes. Nos nós folha de números 2 e 4, há ainda a presença de *outliers* que, mesmo inseridos em grupos nos quais a adoção de tecnologias 4.0 é baixa, diferenciam-se ao adotar até cinco (nó 2) ou seis (nó 4) tecnologias.

FIGURA 4

Estimação não paramétrica para determinantes de adoção de tecnologias 4.0: sem segurança digital



Fonte: CGI.BR (2022).

Elaboração dos autores.

Obs.: Figura cujos leiaute e textos não puderam ser padronizados e revisados em virtude das condições técnicas dos originais (nota do Editorial).

De acordo com a figura 4, ao não considerar a política de segurança digital como variável explicativa, o nó raiz da árvore passa a ser ocupado pelo porte da empresa, significativo a 0,1%, o qual divide-se novamente entre PMEs à esquerda e grandes à direita. O ramo das pequenas e médias atinge um nó interno dado pelo mercado de atuação, que desemboca no nó folha 4, composto pelos CNAEs de informação e comunicação (6), atividades mobiliárias, científicas e administrativas (7), e no nó folha 3 pelos demais CNAEs. Embora os nós 3 e 4 tenham mediana no valor unitário, a adoção de tecnologias 4.0 é ligeiramente superior no nó 4 pela concentração do segundo e terceiro quartis entre uma e duas tecnologias.⁴⁰ A adoção mais intensa de tecnologias 4.0 novamente é determinada pelo porte de grandes empresas, o qual, conforme o nó folha 5, tem mediana em duas tecnologias e quarto quartil variando entre três e seis tecnologias.

5 DISCUSSÃO

A partir das estimações paramétrica e não paramétrica, ainda que haja diversas especificidades de resultados a depender das amostras ou técnicas utilizadas,

40. Apesar disso, o quarto quartil é mais elevado no nó 3, variando entre duas e cinco tecnologias, enquanto no nó 4 varia entre duas e três tecnologias.

destaca-se a relevância de duas variáveis, em especial, para influenciar positivamente a probabilidade de adoção de tecnologias 4.0 em empresas brasileiras: a existência de uma política de segurança digital e o porte da empresa – com 250 ou mais pessoas ocupadas. Além disso, embora mais restrita conforme a base amostral e a variável dependente, o mercado de atuação de informação e comunicação merece menção especial como setor no qual a adoção de tecnologias 4.0 é superior aos demais mesmo em empresas de menor porte.

Questões relacionadas à segurança digital não são exclusivas do âmbito das empresas. Na medida em que indivíduos, organizações e governos tornaram-se dependentes de dispositivos e tecnologias baseados em conectividade – os quais podem proporcionar oportunidades para melhorar a vida e o bem-estar das pessoas (Lange, Montagnier e Phillips, 2023), eles passaram também a estar mais suscetíveis a ameaças cibernéticas. Nesse contexto, a capacidade de proteção contra tais ataques tem se tornado preocupação relevante (WEF, 2023).

Na esfera empresarial, discussões sobre o papel cada vez mais importante de uma política de segurança digital para estruturar a digitalização das empresas têm ocupado extenso espaço na literatura.⁴¹ Apesar disso, ainda pairam muitas dúvidas em termos de conscientização e da melhor forma de implementar estratégias. Segundo WEF e Accenture (2023, p. 4, tradução nossa), baseado em uma pesquisa com 117 respondentes de 32 países e 22 indústrias,

os líderes de negócios estão mais conscientes dos problemas de cibersegurança de suas organizações do que estavam há um ano. Eles também estão mais dispostos a lidar com esses riscos. No entanto, os líderes de cibersegurança ainda têm dificuldade em expressar claramente o risco que as questões de cibersegurança representam para suas organizações em uma linguagem que seus colegas de negócios compreendam plenamente e possam agir. Como resultado, chegar a um acordo sobre a melhor forma de lidar com o risco cibernético continua sendo um desafio para os líderes organizacionais.⁴²

No Brasil, preocupações quanto à cibersegurança parecem mais incipientes. Dados da pesquisa CNI (2022) apontam para divergências frente aos resultados internacionais na medida em que riscos para a segurança da informação ocupam apenas a oitava posição entre as principais barreiras internas que dificultam a adoção de tecnologias digitais em empresas. Ainda, entre os anos de 2016 e 2021, houve queda de 8% para 6% no percentual de respondentes que identificaram a relevância da segurança digital como barreira interna.

41. Para uma caracterização de trabalhos que analisaram o tema de segurança cibernética no contexto da indústria 4.0, ver Azambuja e Almeida (2021).

42. "Business leaders are more aware of their organizations' cyber issues than they were a year ago. They are also more willing to address those risks. Nonetheless, cyber leaders still struggle to clearly articulate the risk that cyber issues pose to their organizations in a language that their business counterparts fully understand and can act upon. As a result, agreeing on how best to address cyber risk remains a challenge for organizational leaders."

Uma das explicações para o aparente pouco interesse no tema da segurança digital entre empresários brasileiros pode ser associado justamente à baixa maturidade da indústria 4.0 no país, de tal forma que os possíveis riscos advindos de sistemas ciberfísicos, tecnologias 4.0, entre outros, ainda não foram passíveis de dimensionamento. Porém, conforme os resultados deste trabalho, possuir uma política de segurança digital é uma das características mais relevantes para que as empresas procedam com a adoção de tecnologias digitais – ou seja, consigam se inserir no processo de transformação digital.

Conforme os resultados dos modelos econométricos, é possível sugerir que a capacidade de implementação de uma política de segurança digital tenha relação com o porte da empresa, na medida em que quando a variável referente à segurança é retirada do modelo, a variável referente ao porte (médias e grandes empresas) cresce em magnitude. Nesse sentido, empresas maiores teriam menos restrições para desenvolver as próprias políticas de segurança digital. A avaliação de tais restrições segue nos parágrafos adiante, quando da análise da influência do porte das empresas sobre a adoção de tecnologias 4.0.

Com relação aos reflexos da segurança digital sobre o mercado de trabalho, a literatura brasileira mostra sinais de ter captado a pertinência do tema. Segundo NEO (2021), a profissão de analista de segurança cibernética foi citada por especialistas como emergente no momento de recuperação verde pós-pandemia. De forma adicional, Kipper *et al.* (2021) colocaram conhecimentos em tópicos relacionados à segurança digital como uma das necessidades dos profissionais durante o processo de qualificação para postos de trabalho da indústria 4.0.

Além da política de segurança digital, as grandes empresas – aquelas com 250 ou mais funcionários, têm probabilidade maior de adotar tecnologias digitais.⁴³ A distinção quanto à adoção de tecnologias 4.0 por empresas de grande porte confirma indicativos de pesquisas realizadas no âmbito nacional – por exemplo, Abimaq e NEO, 2021; CGEE, 2021; CNI, 2016 –, envolvendo os principais desafios para a inserção das PMEs no processo de transformação digital. Altos custos de implementação e falta de trabalhadores qualificados são as principais barreiras interna e externa, respectivamente.

A influência do porte da empresa sobre o nível de adoção de tecnologias digitais é explicitamente abordada também em CNI (2022, p. 9), corroborando os resultados deste trabalho. Segundo a pesquisa, “quanto maior o porte, maior o uso de pelo menos uma tecnologia digital”. Num universo de dezoito tecnologias, entre as grandes, médias e pequenas empresas que adotam ao menos uma, as

43. Embora com ressalvas quanto aos critérios de mensuração e comparabilidade entre empresas de diferentes portes, essa situação é semelhante no cenário internacional. Segundo Lange, Montagnier e Phillips (2023), empresas maiores tendem a ter maior probabilidade em adotar novas tecnologias, incluindo computação em nuvem, IoT, *big data* e IA.

porcentagens são de, respectivamente, 86%, 64% e 42%. Além disso, há relação direta entre o porte e a quantidade de tecnologias adotadas ou o “percentual de empresas que utilizam até seis tecnologias entre as empresas de grande porte é cerca de uma vez e meia maior quando comparado com a utilização entre as de pequeno porte” (CNI, 2022, p. 9).

Tais barreiras insinuam reflexos diretos das dificuldades de acesso a incentivos/financiamentos, as quais acometem sobretudo as MPMEs. Um exemplo na literatura é Veiga e McCahery (2019), que caracterizaram o *gap* de financiamento para PMEs como substancial entre 2014 e 2016 no Brasil. Em estudo complementar, Netto *et al.* (2021) levantam a hipótese de uma espécie de ciclo vicioso no qual as MPMEs têm dificuldades em fornecer informações, documentos e garantias para as instituições financeiras, fazendo com que sejam empurradas a modalidades de crédito com condições inadequadas e elevadas taxas de juros. Ao contribuir para maior inadimplência, isso reforça “a elevada percepção de risco do segmento por parte das instituições financeiras” (Netto *et al.*, 2021, p. 30).

Grandes empresas, por sua vez, apresentam vantagens comparativas nesse contexto – por exemplo, estrutura de capital que permite a utilização de recursos próprios, posse de detalhes quanto a informações e garantias capazes de tornar a relação com instituições financeiras sujeitas a menos desconfiança –, as quais influenciam positivamente a capacidade de investimento em novas tecnologias e mão de obra qualificada para desenvolver os processos de transformação digital.

De uma perspectiva mais abrangente, a atuação governamental com objetivo no relaxamento de restrições, como acesso a crédito, para além das organizações de grande porte, dialoga com a proposta contida em Rodrik (2022), a qual enfatiza o eminente papel desempenhado pelas PMEs como pontos focais em um novo arcabouço de política industrial. O autor defende políticas industriais com foco em empregos de qualidade, que não serão gerados majoritariamente no setor manufatureiro. Por isso a importância do setor de serviços, no qual predominam as firmas de menor porte.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho objetivou descrever os principais conceitos associados ao tema da indústria 4.0 e avaliar, a partir de dados da pesquisa TIC Empresas 2021, possíveis determinantes da adoção de tecnologias 4.0 por empresas brasileiras. Para tanto, partiu-se de uma revisão bibliográfica inicialmente abrangente, para então detalhar as iniciativas locais contempladas pela Câmara I4.0. Por fim, por meio da estimação de modelos paramétricos e não paramétricos, foram destacadas características das empresas com influência significativa sobre processos de digitalização.

A análise de literatura apontou para dificuldades estruturais do Brasil diante das principais potências tecnológicas no que diz respeito à solidez da indústria 4.0, mas também trouxe iniciativas importantes fomentadas pelo poder público, com destaque para a e-Digital e para o Plano Nacional de Internet das Coisas. Com relação aos principais resultados das estimações dos modelos, duas variáveis tiveram proeminência para explicar a adoção de tecnologias digitais: a existência de uma política de segurança digital e o fato de uma empresa ter 250 ou mais funcionários. Reforça-se, assim, que a transformação digital tem sido um processo em parte restrito às grandes empresas, as quais têm menos dificuldade em acessar o conhecimento técnico necessário, bem como mão de obra qualificada e financiamento adequado.

Embora diversas iniciativas interessantes tenham foco em promover a transformação digital nas PMEs brasileiras, como a Jornada da Transformação Digital, esse é um processo relativamente lento, que aparenta exigir incentivos adicionais das esferas pública e privada. Em especial, destaca-se a necessidade de facilitação de financiamento para acessar novas tecnologias em termos monetários, mas também uma carência na atualização dos respectivos modelos de negócio das empresas, os quais, com frequência, se mostram engessados ante as cada vez mais aceleradas mudanças tecnológicas. Não menos importante, a lacuna de profissionais qualificados exige um debate mais profundo sobre o sistema educacional e suas possibilidades de suprir a demanda necessária para tornar o Brasil um *player* significativo no contexto da quarta revolução industrial.

Este estudo baseou-se exclusivamente em informações da TIC Empresas 2021. Estudos futuros, no entanto, podem utilizar o cruzamento com outras bases de dados, como a Relação Anual de Informações Sociais (Rais).

REFERÊNCIAS

- ABIMAQ – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS; NEO – NÚCLEO DE ENGENHARIA ORGANIZACIONAL. **Indústria 4.0**: transformação digital e inovação de modelos de negócio na indústria de máquinas e equipamentos. Rio de Janeiro: Abimaq; NEO, 2021. Disponível em: <https://camara40.com.br/wp-content/uploads/2021/06/Relatorio-Geral-ABIMAQ-Final-R05.pdf>. Acesso em: 3 fev. 2023.
- AHMI, A.; ELBARDAN, H.; RAJA MOHD ALI, R. H. Bibliometric analysis of published literature on Industry 4.0. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRONICS, INFORMATION, AND COMMUNICATION (ICEIC), 18., 2019. **Proceedings**... Auckland, New Zealand. Auckland: IEEE, 2019. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8706445/>. Acesso em: 8 fev. 2023.

ARBIX, G. *et al.* O Brasil e a nova onda de manufatura avançada: o que aprender com Alemanha, China e Estados Unidos. **Novos Estudos**, v. 36, n. 3, p. 29-49, 2017.

AZAMBUJA, A. J. G. D.; ALMEIDA, V. R. Um estudo bibliométrico das publicações sobre segurança cibernética na indústria 4.0. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 3, 2021.

BELLOCCO, R.; ALGERI, S. Goodness-of-fit tests for categorical data. **The Stata Journal**, v. 13, n. 2, p. 356-365, 2013.

CAIRA, C.; PERSET, K. **The future of artificial intelligence: working party on artificial intelligence governance**. Paris: OECD, 2023.

CGEE – CENTRO DE GESTÃO DE ESTUDOS ESTRATÉGICOS. **Diagnóstico e contextualização do arcabouço normativo para a implementação da Indústria 4.0 no Brasil**. Brasília: CGEE, 2020. (Nota Técnica). Disponível em: <https://camara40.com.br/wp-content/uploads/2021/04/Nota-Te%CC%81cnica-Normalizac%CC%A7a%CC%83o-Industria-4.0.pdf>. Acesso em: 22 fev. 2023.

_____. **Percepção das empresas sobre a normalização técnica para a indústria 4.0 no Brasil**. Brasília: CGEE, 2021. (Nota Técnica). Disponível em: <https://camara40.com.br/wp-content/uploads/2021/04/Nota-Tecnica-2-Normalizacao-tecnica-R01.pdf>. Acesso em: 17 fev. 2023.

_____. **Segmentos ou nichos com maior potencial para o desenvolvimento tecnológico nacional**. Brasília: CGEE, 2022. (Nota Técnica). Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/transformacaodigital/arquivo-camara-industria/iniciativas/ci_nt_nicho_tec_nac.pdf. Acesso em: 1º mar. 2023.

CGEE – CENTRO DE GESTÃO DE ESTUDOS ESTRATÉGICOS; MCTI – MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. **Estratégia Brasileira para a Transformação Digital (e-Digital): ciclo 2022-2026**. Brasília: CGEE; MCTI, 2022. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/transformacaodigital/arquivosestrategiadigital/e-digital_ciclo_2022-2026.pdf. Acesso em: 18 nov. 2022.

CGI.BR – COMITÊ GESTOR DA INTERNET NO BRASIL. **Pesquisa sobre o uso das tecnologias de informação e comunicação nas empresas brasileiras: TIC Empresas 2021**. São Paulo: CGI.Br, 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.

CNI – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Especial survey: Industry 4.0 – CNI Indicators**. Brasília: CNI, 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.

_____. **Oportunidades para a indústria 4.0: aspectos da demanda e oferta no Brasil**. Brasília: CNI, 2017. Disponível em: <https://www.portaldaindustria.com.br/publicacoes/2018/2/oportunidades-para-industria-40-aspectos-da-demanda-e-oferta-no-brasil/>. Acesso em: 2 mar. 2023.

_____. **Indústria 4.0: cinco anos depois**. Brasília: CNI, 2022. Disponível em: <https://www.portaldaindustria.com.br/estatisticas/sondesp-83-industria-40-cinco-anos-depois/>. Acesso em: 8 maio 2023.

DAUDT, G.; MIGUEZ, T.; WILLCOX, L. D. **Indústria 4.0**. Rio de Janeiro: BNDES, 2018. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/18140>. Acesso em: 2 mar. 2023.

EUROPEAN COMMISSION. **Germany: Industrie 4.0**. Brussels: EC, 2017. Disponível em: https://ati.ec.europa.eu/sites/default/files/2020-06/DTM_Industrie%204.0_DE.pdf. Acesso em: 8 fev. 2023.

FURSTENAU, L. B. *et al.* Link between sustainability and Industry 4.0: trends, challenges and new perspectives. **IEEE Access**, v. 8, p. 140079-140096, 2020.

GUJARATI, D. N.; PORTER, D. C. **Basic econometrics**. 5th ed. Boston: McGraw-Hill Irwin, 2009.

IEDI – INSTITUTO DE ESTUDOS PARA O DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL. **A indústria do futuro no brasil e no mundo**. São Paulo: IEDI, 2019. Disponível em: https://iedi.org.br/media/site/artigos/20190311_industria_do_futuro_no_brasil_e_no_mundo.pdf. Acesso em: 2 mar. 2023.

IEEE – INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **International Network Generations Roadmap: executive summary**. [s.l.]: IEEE Future Networks, 2022a. Disponível em: <https://futurenetworks.ieee.org/images/files/pdf/INGR-2022-Edition/IEEE-INGR-Executive-Summary-2022-Edition.pdf>. Acesso em: 22 fev. 2023.

_____. **International Network Generations Roadmap: edge services and automation working group**. [s.l.]: IEEE Future Networks, 2022b. Disponível em: <https://futurenetworks.ieee.org/roadmap/ingr-2022-edition/>. Acesso em: 22 fev. 2023.

_____. **International Network Generations Roadmap: applications and services working group**. [s.l.]: IEEE Future Networks, 2022c. Disponível em: <https://futurenetworks.ieee.org/roadmap/ingr-2022-edition/>. Acesso em: 22 fev. 2023.

_____. **International Network Generations Roadmap**: artificial intelligence and machine learning working group. [s.l.]: IEEE Future Networks, 2022d. Disponível em: <https://futurenetworks.ieee.org/roadmap/ingr-2022-edition/>. Acesso em: 22 fev. 2023.

IEL – INSTITUTO EUVALDO LODI. **Síntese dos resultados**: construindo o futuro da indústria brasileira. Rio de Janeiro: IEL, 2018. Disponível em: https://www.ie.ufrj.br/images/IE/grupos/GIC/publica%C3%A7%C3%B5es/2019.%20IEL-NC%20et%20al.%20I2027_sintese_vol1-2.pdf. Acesso em: 2 mar. 2023.

KAGERMANN, H. Change through digitization: value creation in the age of Industry 4.0. *In*: ALBACH, H. *et al.* (Ed.). **Management of permanent change**. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015. p. 23-45.

KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W. Ten years of Industrie 4.0. **Sci**, v. 4, n. 3, p. 26, 2022.

KIPPER, L. M. *et al.* Scopus scientific mapping production in industry 4.0 (2011-2018): a bibliometric analysis. **International Journal of Production Research**, v. 58, n. 6, p. 1605-1627, 2020.

_____. Scientific mapping to identify competencies required by industry 4.0. **Technology in Society**, v. 64, p. 101454, 2021.

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, 2017.

KUBOTA, L. C.; ROSA, M. B. Internet das coisas no Brasil: breve descrição de políticas e casos de sucesso. **Radar: Tecnologia, Produção e Comércio Exterior**, n. 71, p. 17-23, 2023.

KUPFER, D. Indústria 4.0 Brasil. **Valor Econômico**, 8 ago. 2016. Disponível em: <https://valor.globo.com/opiniao/coluna/industria-4-0-brasil.ghtml>.

LANGE, S.; MONTAGNIER, P.; PHILLIPS, S. **Digital technology diffusion and data**: working party on measurement and analysis of the digital economy. Paris: OECD, 2023.

LASI, H. *et al.* Industry 4.0. **Business and Information Systems Engineering**, v. 6, n. 4, p. 239-242, 2014.

LIMA, F. R.; GOMES, R. Conceitos e tecnologias da indústria 4.0: uma análise bibliométrica. **Revista Brasileira de Inovação**, v. 19, p. e0200023, 2020.

MADAKAM, S.; RAMASWAMY, R.; TRIPATHI, S. Internet of Things (IoT): a literature review. **Journal of Computer and Communications**, v. 3, n. 5, p. 164-173, 2015.

MUHURI, P. K.; SHUKLA, A. K.; ABRAHAM, A. Industry 4.0: a bibliometric analysis and detailed overview. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 78, p. 218-235, 2019.

NASCIMENTO, M. R. Ecossistemas de conhecimento sobre indústria 4.0 no Brasil: uma análise bibliométrica. **AtoZ: Novas Práticas em Informação e Conhecimento**, v. 10, n. 3, p. 1, 2021.

NEO–NÚCLEO DE ENGENHARIA ORGANIZACIONAL. **Demonstradores da indústria 4.0**. Brasília: NEO, 2020. Disponível em: https://antigo.mctic.gov.br/mctic/export/sites/institucional/tecnologia/tecnologias_convergentes/paginas/Arquivo/01-Rel-Demonstrador-Camara-4.0-NEO_UFRGS-VF-dez2020.pdf. Acesso em: 3 fev. 2023.

_____. **Profissões emergentes na Era Digital: oportunidades e desafios na qualificação profissional para uma recuperação verde**. Brasília: NEO, 2021. Disponível em: https://static.portaldaindustria.com.br/media/filer_public/b7/5a/b75af326-9c36-49e7-b298-1b9f0a3d4938/estudo_profissoes_emergentes_-_giz_ufrgs_e_senai.pdf. Acesso em: 6 mar. 2023.

NETTO, M. *et al.* (Ed.). **Apoio às MPMEs na crise da covid-19: desafios do financiamento para resiliência e recuperação**. Washington: IADB, 2021.

RODRIK, D. **An industrial policy for good jobs**. Cambridge: Harvard University, 2022. (The Hamilton Project). Disponível em: <https://drodrik.scholar.harvard.edu/publications/industrial-policy-good-jobs>.

SCHUH, G. *et al.* Collaboration mechanisms to increase productivity in the context of Industrie 4.0. **Procedia CIRP**, v. 19, p. 51-56, 2014.

SONG, Y.; LU, Y. Decision tree methods: applications for classification and prediction. **Shanghai Archives of Psychiatry**, v. 27, n. 2, p. 130-135, 2015.

SPADINGER, R. **Situação atual e perspectivas dos serviços e tecnologias associadas ao 5G na Europa: internet das coisas (IoT), indústria 4.0**. Brasília: Ipea, 2021. (Nota Técnica, n. 90).

TORTORELLA, G. L.; FETTERMANN, D. Implementation of Industry 4.0 and lean production in Brazilian manufacturing companies. **International Journal of Production Research**, v. 56, n. 8, p. 2975-2987, 2018.

VEIGA, M. G.; MCCAHERY, J. A. The financing of small and medium-sized enterprises: an analysis of the financing gap in Brazil. **European Business Organization Law Review**, v. 20, n. 4, p. 633-664, 2019.

VELHO, S.; BARBALHO, S. Um observatório latino-americano da indústria 4.0. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE INOVAÇÃO E GESTÃO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO, 12., 2019, Brasília, Distrito Federal. **Anais...** São Paulo: Editora Blucher, 2019. Disponível em: <http://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/33552>. Acesso em: 8 fev. 2023.

VIEIRA, P. A.; OURIQUES, H. R.; AREND, M. A posição do Brasil frente à indústria 4.0: mais uma evidência de rebaixamento para a periferia? **Oikos**, v. 19, n. 3, p. 12-34, 2020.

WEF – WORLD ECONOMIC FORUM. **Accelerating the impact of industrial IoT in small and medium-sized enterprises: a protocol for action**. Cologny: WEF, 2020. Disponível em: <https://www.weforum.org/whitepapers/accelerating-the-impact-of-industrial-iot-in-small-and-medium-sized-enterprises-a-protocol-for-action/>. Acesso em: 7 mar. 2023.

_____. **State of the connected world 2023 edition**. Cologny: WEF, 2023. Disponível em: <https://www.weforum.org/reports/state-of-the-connected-world-2023-edition/>. Acesso em: 31 jan. 2023.

WEF – WORLD ECONOMIC FORUM; ACCENTURE. **Global cybersecurity outlook 2023**. Cologny: WEF; Accenture, 2023. Disponível em: <https://www.weforum.org/reports/global-cybersecurity-outlook-2023/>. Acesso em: 19 jan. 2023.

WOOLDRIDGE, J. M. **Econometric analysis of cross section and panel data**. 2nd ed. Cambridge: MIT Press, 2010.

XU, L. D.; XU, E. L.; LI, L. Industry 4.0: state of the art and future trends. **International Journal of Production Research**, v. 56, n. 8, p. 2941-2962, 2018.

