

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE CIÊNCIAS ECONÔMICAS
DEPARTAMENTO DE ECONOMIA E RELAÇÕES INTERNACIONAIS**

FELIPE JAEGER ANDREIS

**INDÚSTRIA 4.0: CONTEXTO INTERNACIONAL E POLÍTICA INDUSTRIAL
BRASILEIRA**

Porto Alegre

2022

FELIPE JAEGER ANDREIS

**INDÚSTRIA 4.0: CONTEXTO INTERNACIONAL E POLÍTICA INDUSTRIAL
BRASILEIRA**

Trabalho de conclusão submetido ao Curso de Graduação em Relações Internacionais da Faculdade de Ciências Econômicas da UFRGS, como requisito parcial para obtenção do título Bacharel em Relações Internacionais.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Milan

Porto Alegre

2022

CIP - Catalogação na Publicação

Andreis, Felipe Jaeger
Indústria 4.0: contexto internacional e política industrial brasileira / Felipe Jaeger Andreis. -- 2022.
94 f.
Orientador: Marcelo Milan.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Ciências Econômicas, Curso de Relações Internacionais, Porto Alegre, BR-RS, 2022.

1. Indústria 4.0. 2. Competitividade. 3. Política industrial. 4. Brasil. I. Milan, Marcelo, orient. II. Título.

FELIPE JAEGER ANDREIS

**INDÚSTRIA 4.0: CONTEXTO INTERNACIONAL E POLÍTICA INDUSTRIAL
BRASILEIRA**

Trabalho de conclusão submetido ao Curso de Graduação em Relações Internacionais da Faculdade de Ciências Econômicas da UFRGS, como requisito parcial para obtenção do título Bacharel em Relações Internacionais.

Aprovado em: Porto Alegre, ____ de ____ de 2022.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Marcelo Milan – Orientador

UFRGS

Prof.^a Dr.^a Ana Lúcia Tatsch

UFRGS

Prof. Dr. Carlos Henrique Vasconcellos Horn

UFRGS

A todos que inspiram resiliência.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, estendo meus agradecimentos à Universidade Federal do Rio Grande do Sul, que desempenha um papel fundamental na qualificação daqueles que por ali passam e na construção de uma sociedade pautada pelo conhecimento. O ambiente acadêmico ao qual pude ter acesso foi extremamente relevante para meu crescimento, no qual fui sempre instigado a dar meu melhor, seja por meio de interações com meus professores, colegas ou outros alunos. Em relação aos projetos dos quais participei ao longo desse período, meu agradecimento especial à Atlântica, Empresa Júnior do curso de Relações Internacionais, em que pude vivenciar os resultados inesperados que podem ser alcançados quando se tem uma equipe unida sob um propósito. Sou muito grato por ter feito parte disso tudo.

Agradeço aos meus pais, Eliane e Paulo, por sempre terem me apoiado e por nunca terem medido esforços para me proporcionar excelentes oportunidades. Mesmo sem saber, conseguem construir um curioso grau de complementaridade entre suas atitudes e conselhos que me fazem enxergar claramente um norte para minhas decisões. Ser família é fazer a diferença mesmo quando não percebemos, devo isso a vocês.

À minha irmã, Júlia, pela enorme parceria que viemos cultivando ao longo dos anos. Nunca tive dúvida de que nos daríamos bem, mas talvez não esperasse tamanha proximidade a ponto de compartilharmos nossas experiências da forma como fazemos.

Agradeço ao professor Marcelo, pelo auxílio e compreensão desde as primeiras construções desde o projeto inicial. Suas contribuições foram muito valiosas do início ao fim e não apenas em relação ao presente trabalho, mas também em minha formação quando tive a oportunidade de ser seu aluno. Agradeço também ao professor Alejandro G. Frank, do Departamento de Engenharia de Produção e Transportes, pelo direcionamento inicial a respeito do tema multidisciplinar que é a Indústria 4.0.

Por fim, agradeço a todos os meus amigos que estiveram comigo ao longo dessa jornada. Desde meus conterrâneos de Caxias, aos quais devo muitas risadas, compartilhamento de experiências e mesmo vivências que construímos juntos e cuja proximidade, mesmo que a física não seja mais tão constante, segue inalterada. Agradeço também aos amigos que fiz em Porto Alegre, dos quais muitos foram meus colegas de trabalho ou faculdade e que participaram diretamente do meu processo de amadurecimento intelectual e emocional. Agradeço inclusive àqueles que tiveram um papel essencial nisso tudo, mas que hoje, por qualquer que seja o motivo, encontram-se mais distantes. Espero ter

contribuído para o desenvolvimento de todos aqui mencionados de igual forma. Obrigado, pessoal, sem vocês não teria graça!

“The long run is here, it’s time to get sober!”

– Interpretação de F. A. Hayek, Emergent Order

RESUMO

A Indústria 4.0 consiste em um novo estágio de maturidade industrial marcado pela ampla integração dos recursos tecnológicos que compõem a cadeia de valor da indústria em termos informacionais e de processos. Espera-se que os aspectos disruptivos da Quarta Revolução Industrial, representativa deste estágio, sejam capazes de superar os impactos verificados a partir das transições de paradigmas anteriores. Isso motiva as nações, em especial as economias desenvolvidas, a estruturar iniciativas com vistas à melhoria de sua competitividade a nível internacional no que diz respeito à consolidação de vantagens que permitam a elas ocupar posições relevantes na nova era industrial. O Estado brasileiro, contudo, vem negligenciando a necessidade latente de abordar o tema da Indústria 4.0 a partir de uma política industrial nos últimos anos. Desta forma, o presente trabalho busca identificar, com base na experiência internacional, as prioridades de atuação que tornem uma eventual nova política industrial brasileira potencialmente apta a endogeneizar a dinâmica da Quarta Revolução Industrial. Para isso, inicialmente, realizou-se a revisão dos aspectos teóricos presentes na literatura a respeito da Indústria 4.0. Em seguida, foi utilizado o modelo do Diamante Competitivo, proposto por Michael Porter, para refletir sobre a competitividade da Indústria 4.0 nas economias de Alemanha, China e Brasil. Foram então comparados os resultados dos três estudos de caso de forma a sugerir, com base nos cenários interno e externo, uma priorização dos fatores analisados em termos de uma eventual política industrial brasileira que busque impulsionar a transição do paradigma produtivo no país. Concluiu-se, assim, que o *governo* e as *condições dos fatores de produção* deveriam ser priorizados, cabendo às *indústrias relacionadas e de apoio* e à *estratégia, estrutura e rivalidade das empresas* um nível de prioridade secundário.

Palavras-chave: Indústria 4.0. Competitividade. Política industrial. Brasil.

ABSTRACT

Industry 4.0 consists in a new stage of industrial maturity marked by the wide integration of technological resources which make up industries' value chain in an informational and procedural way. It is expected that the disruptive aspects of the Fourth Industrial Revolution, emblematic of this stage, will overcome the impacts originated from the previous paradigm transitions. This motivates nations, especially the developed economies, to structure initiatives which aim to improve their international competitiveness regarding the strengthening of advantages that allow them to achieve prominent roles in the new industrial era. Brazil, however, has been neglecting the latent need to address the Industry 4.0 topic through industrial policy mechanisms in recent years. Therefore, this paper seeks to identify the priorities which could turn a new eventual Brazilian industrial policy into a potentially capable tool for internalizing the dynamics of the Fourth Industrial Revolution based on international experience. In order to achieve this, a review of the theoretical aspects that appear in the literature regarding Industry 4.0 was initially carried out. Then, the Diamond Model proposed by Michael Porter was applied in order to assess Industry 4.0 competitiveness in the German, Chinese and Brazilian economies. The results of the three case studies were thus compared in order to suggest a prioritization of the factors analyzed concerning an eventual Brazilian industrial policy that would aim at promoting the transition of the productive paradigm in the country based on internal and external scenarios. It was concluded that *government* and *factor conditions* should be prioritized, with *related and supporting industries* and *firm strategy, structure and rivalry* being given a secondary priority level.

Keywords: Industry 4.0. Competitiveness. Industrial policy. Brazil.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABDI	Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial
ACATECH	Academia Nacional de Ciências e Engenharia (Alemanha)
BMBF	Ministério Federal da Educação e Pesquisa (Alemanha)
BMWI	Ministério Federal da Economia e Energia (Alemanha)
BMWK	Ministério Federal da Economia e Proteção Climática (Alemanha)
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CLP	Controlador Lógico Programável
CNI	Confederação Nacional da Indústria
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CT-Infra	Fundo Setorial de Infraestrutura
CT-Petro	Fundo Setorial do Petróleo
EUA	Estados Unidos da América
FEM	Fórum Econômico Mundial
FNDCT	Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
IA	Inteligência Artificial
IoT	<i>Internet of Things</i>
IPEA	Instituto de Pesquisas Econômicas Aplicadas
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (Brasil)
MITI	Ministério da Indústria e Tecnologia da Informação (China)
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PIB	Produto Interno Bruto
PME	Pequena e Média Empresa
II PND	II Plano Nacional de Desenvolvimento
PPC	Paridade do Poder de Compra
SENAI	Sistema Nacional de Aprendizagem Industrial
TIC	Tecnologia da Informação e Comunicação

UE

União Europeia

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
2 COMPREENDENDO A INDÚSTRIA 4.0	18
2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO, DEFINIÇÃO E PRINCÍPIOS.....	18
2.2 TECNOLOGIAS E RECURSOS TÉCNICOS.....	22
2.3 INDÚSTRIA 4.0: INFLEXÃO E ECOSSISTEMAS DE INOVAÇÃO.....	31
2.4 IMPACTOS DA INDÚSTRIA 4.0 SOBRE O TRABALHO	37
2.5 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES.....	41
3 A QUARTA REVOLUÇÃO INDUSTRIAL: UM PANORAMA INTERNACIONAL	42
3.1 A COMPETITIVIDADE INTERNACIONAL E O DIAMANTE DE PORTER	42
3.2 UMA AVALIAÇÃO DA INDÚSTRIA 4.0 A PARTIR DA ÓTICA DA COMPETITIVIDADE: OS CASOS DE ALEMANHA E CHINA.....	51
3.2.1 Alemanha.....	52
3.2.2 China.....	59
3.3 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES.....	64
4 INDÚSTRIA 4.0: O CASO BRASILEIRO.....	66
4.1 A INDÚSTRIA 4.0 NO BRASIL	66
4.2 ALTERNATIVAS À INSERÇÃO COMPETITIVA DO BRASIL NO NOVO PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL.....	77
4.3 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES.....	79
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	81
REFERÊNCIAS.....	87

1 INTRODUÇÃO

A organização das estruturas produtivas ao longo da história humana é um reflexo da estrutura socioeconômica vigente. Contudo, a partir do marco inicial de determinação das funções dos agentes envolvidos e da gradativa consolidação dos processos utilizados, passa a ser também um vetor importante de transformação que atua sobre a própria sociedade. A indústria, desde o seu estabelecimento, pode ser encarada como um resultado de três aspectos fundamentais, quais sejam: conhecimento, experimentação e inovação empreendedora (CARVALHO; CAZARINI, 2020). A combinação dos diferentes desenvolvimentos destes aspectos no decorrer do tempo, associada ao próprio acúmulo de inovações e descobertas já acumulados, descrevem o processo de evolução da indústria. Este é caracterizado por três Revoluções Industriais concluídas – embora não totalmente difundidas –, convencionalmente situadas pela academia na metade do Século XVIII, na segunda metade do Século XIX e na década de 1970, respectivamente (CARVALHO; CAZARINI, 2020).

A Quarta Revolução Industrial surge então como uma nova fase do progresso industrial, atualmente em curso. O termo Indústria 4.0 foi utilizado pela primeira vez em 2011 na feira de tecnologia de Hannover, na Alemanha, para referir-se a mudanças diretamente relacionadas à integração das tecnologias da informação e comunicação (TICs) à automação da produção (SCHUH et al., 2020). Posteriormente, passou a ser adotado de forma ampla por pesquisadore(a)s para conceituar um novo estágio de maturidade industrial baseado na alta conectividade dos componentes envolvidos na produção, na completa integração da indústria em termos informacionais e de processos, na alta capacidade de customização dos serviços e dos produtos criados e na grande flexibilidade da estrutura produtiva para se adaptar a mudanças nos ambientes interno e externo (FRANK; DALENOGARE; AYALA, 2019; SCHUH et al., 2020).

Nesse ínterim, o maior potencial econômico vislumbrado para a Indústria 4.0 está relacionado a sua capacidade de potencializar o processo de tomada de decisão nas companhias (SCHUH et al., 2020). A geração e o processamento de dados em tempo real fornecem um grau de detalhamento de informações nunca antes verificado para sustentar a constante avaliação da situação: i) dos diferentes níveis hierárquicos nas empresas; ii) da condução dos processos em outras etapas da cadeia de valor, a exemplo de fornecedores, operadores logísticos e compradores (DALENOGARE et al., 2018). Tal nível de integração acarreta uma melhor compreensão da realidade por parte dos agentes envolvidos,

possibilitando-os a fazer escolhas mais eficazes e mesmo a antecipar mudanças futuras, especialmente relacionadas às características da demanda (SCHUH et al., 2020).

Espera-se que a Quarta Revolução Industrial conte com aspectos disruptivos capazes de superar os impactos verificados a partir das transições de paradigmas anteriores (SCHWAB, 2016). Além dos pontos já elencados, outros dois podem ser ainda destacados a esse respeito. O primeiro se refere à transição de um modelo baseado em transações – característico de todas as revoluções industriais anteriores – para outro baseado na cocriação. Isso faz com que a contribuição individual de cada agente em termos de módulos específicos de tecnologia para a constituição da cadeia de valor seja substituída pelo desenvolvimento conjunto entre estes agentes de soluções tecnológicas nos ditos ecossistemas de inovação (BENITEZ; AYALA; FRANK, 2020). O segundo, por sua vez, resulta do alto nível de autonomia da planta fabril esperado a partir da implementação de tecnologias 4.0 ao processo produtivo, fazendo com que o trabalho humano seja virtualmente excluído da grande maioria das etapas de produção (POPKOVA; RAGULINA; BOGOVIZ, 2018).

Embora ainda em estágio inicial, a transição produtiva já é uma realidade em economias desenvolvidas e emergentes. Diversas iniciativas em curso têm sido responsáveis por moldar a competitividade das nações a nível mundial no que diz respeito à consolidação de vantagens que permitam a elas ocupar posições relevantes na nova era industrial. Frente a isso, traz-se à discussão da Indústria 4.0 o modelo do Diamante Competitivo, proposto por Michael Porter em 1990, como meio de avaliação do ambiente econômico interno dos países a fim de identificar quais são os principais fatores responsáveis por fazer com que os novos setores industriais apresentem maior grau de desenvolvimento em alguns países do que em outros a partir da criação do que o autor nomeou como vantagens competitivas. O modelo elenca quatro fatores principais, *condições dos fatores, condições de demanda, indústrias relacionadas e de apoio e estratégia, estrutura e rivalidade das empresas*, além de dois outros adicionais, *acaso e governo*, como vetores de formação das vantagens competitivas nacionais (PORTER, 1990a).

Mesmo se tratando de uma avaliação acerca de um paradigma industrial e não exatamente de um setor, como originalmente previsto, a ferramenta coloca-se como instrumento teórico pertinente para endereçar o problema central do presente trabalho: como devem ser definidas as prioridades de atuação de uma política industrial brasileira que objetive desenvolver a Indústria 4.0? Nesse sentido, delimitações à análise dos fatores proposta por Porter são feitas no sentido de garantir ao presente trabalho maior adequação e direcionamento à realidade específica da Quarta Revolução Industrial: i) não se buscou

realizar uma avaliação das *condições de demanda* devido à incipiência da própria produção de bens e serviços a partir do novo paradigma industrial, dificultando a identificação de padrões claros para esse fator; ii) o fator *acaso* também não foi considerado na análise por não contar com aspectos exclusivos à Indústria 4.0.

Tanto a bibliografia analisada quanto as experiências internacionais corroboram o posicionamento de que o papel do governo é fundamental no processo de transição para o próximo paradigma industrial caso os países desejem obter uma posição de relevância a partir das grandes transformações que se configuram. Logo, delimita-se o objetivo geral do presente trabalho como o de identificar, com base na experiência internacional, as prioridades de atuação que tornem uma eventual nova política industrial brasileira potencialmente apta a endogeneizar a dinâmica da Quarta Revolução Industrial. Como objetivos específicos, buscou-se: i) discutir as características da Quarta Revolução Industrial; ii) examinar as abordagens teóricas sobre a competitividade dos países; iii) analisar o modelo do Diamante Competitivo, proposto por Porter; iv) avaliar vantagens competitivas de dois dos países mais avançados em termos da Indústria 4.0; v) avaliar vantagens competitivas do Brasil em termos da Indústria 4.0; e vi) identificar medidas concretas que poderiam ser tomadas pelo Brasil para impulsionar a transição paradigmática da indústria nacional.

Com vistas ao atingimento dos objetivos propostos, foi realizada uma revisão dos aspectos teóricos presentes na literatura a respeito da Indústria 4.0. Dessa forma, foi possível consolidar os pontos essenciais para que se compreendesse a Quarta Revolução Industrial em toda sua amplitude. Feito isso, foi utilizado o modelo do Diamante Competitivo de Porter para avaliar a competitividade da Indústria 4.0 nas economias de Alemanha, China e Brasil. Foram elencados indicadores parciais para avaliar o grau de desenvolvimento de cada um dos fatores que compõem o modelo do Diamante Competitivo, acessados através de bases de dados, de estudos que qualificassem o indicador em questão e, preferencialmente, analisassem-no frente aos demais países considerados no presente trabalho, ou mesmo a partir da utilização de ambas as abordagens. Por fim, foram comparados os resultados dos três estudos de caso de forma a sugerir, com base nos cenários interno e externo, diretrizes de atuação de uma eventual política industrial brasileira que busque impulsionar a transição do paradigma produtivo estudado no país.

Ademais, o presente tema se mostra extremamente relevante dadas as circunstâncias atuais com relação à Quarta Revolução Industrial. Vivemos um momento histórico de transição para um novo paradigma produtivo, que apresenta novas oportunidades de desenvolvimento econômico, mas também grandes riscos com relação ao aprofundamento das

desigualdades socioeconômicas. Isso faz com que seja imprescindível uma reflexão qualificada e posterior posicionamento estratégico por parte dos governos ao redor do mundo, para que não embarquem nesse processo de forma passiva, sem controle das consequências dele advindas. Muito preocupante é o fato de o Brasil, apesar da série de estudos produzidos no meio acadêmico nacional nos últimos anos a respeito do tema Indústria 4.0 e da relevância do papel do governo na condução dos esforços nacionais sobre o assunto, seguir sem diretrizes claras de uma política industrial capaz de aliar as mudanças em curso à promoção do desenvolvimento econômico nacional – questão essa que parece ter sido abordada com um grau insuficiente de criatividade pelo menos desde o II Plano Nacional de Desenvolvimento (II PND). Busca-se, portanto, contribuir para a evolução desse debate.

O trabalho está organizado em cinco partes, incluindo esta introdução e as considerações finais. O primeiro capítulo busca sistematizar e discutir a Indústria 4.0 enquanto fenômeno a partir de estudos já realizados a esse respeito. Para tanto, são destacadas as diferentes abordagens dos países a respeito do tema, selecionando-se o conceito trazido por Carvalho e Cazarini (2020) como ponto de partida da discussão e elencando-se os princípios estruturantes que sustentam o novo paradigma industrial. Ademais, são apresentadas as tecnologias fundamentais que viabilizam os princípios estruturantes a partir de sua integração à linha de produção, que ocorre por meio das tecnologias de interface, também examinadas no referido capítulo. Para além dos recursos técnicos, são ponderados também os pontos de inflexão que garantem à Indústria 4.0 o seu caráter revolucionário, bem como seus impactos sobre outro fator de produção diretamente envolvido, qual seja, o trabalho humano.

O capítulo seguinte, por sua vez, discute as diferentes abordagens teóricas sobre a competitividade das nações e os principais pontos do modelo do Diamante Competitivo de Porter, atentando para os principais indicadores dos atributos a serem analisados. São também analisados os estudos de caso de Alemanha e China a partir da aplicação do referido modelo, com indicadores previamente definidos para cada um dos atributos da maneira que segue: i) *condições dos fatores*: condições do grau de especialização da mão de obra, condições dos centros de pesquisa e desenvolvimento (P&D), condições de infraestrutura e condições de financiamento; ii) *indústrias relacionadas e de apoio*: análise das indústrias nacionais de semicondutores e *software*; iii) *estratégia, estrutura e rivalidade das empresas*: análise da disseminação das novas tecnologias sobre as pequenas e médias empresas (PMEs); e iv) *governo*: abordado de forma indireta a partir da exposição de iniciativas provenientes desta esfera ao longo da análise das outras três variáveis, quando pertinente. Cabe salientar que se buscou especificar – com certo grau de simplificação – a dinâmica da Indústria 4.0 a partir da

escolha de tais indicadores, qualificando-os, quando necessário, apenas a partir de estudos que levassem em consideração a Quarta Revolução Industrial.

Ao terceiro capítulo cabe a análise do caso brasileiro mediante a aplicação do modelo proposto a partir dos mesmos parâmetros utilizados nos casos anteriores. Posteriormente, frente às análises do contexto interno e das experiências internacionais, elencam-se algumas conclusões práticas que têm por objetivo sugerir diretrizes de atuação de uma eventual política industrial brasileira voltada ao novo paradigma industrial. Vale ressaltar que não é do escopo do presente trabalho definir iniciativas para endereçar os principais pontos levantados, mas sim elencar a priorização de atuação do governo sobre cada fator avaliado a partir da constelação existente e das necessidades do novo paradigma.

2 COMPREENDENDO A INDÚSTRIA 4.0

O surgimento recente do tema Indústria 4.0 faz com que muitos dos conceitos que o permeiam ainda se encontrem em processo de sistematização, não sendo possível determinar com alto nível de precisão quais serão os impactos trazidos pela nova era industrial. Contudo, um grande volume de literatura tem sido produzido nos últimos anos para que se possa aprofundar a consolidação teórica do tema. O presente capítulo busca, dessa forma, discutir as características da Quarta Revolução Industrial ao longo das seções que seguem. A seção 2.1 contextualiza o surgimento das diferentes abordagens existentes sobre o tema, bem como define o conceito de Indústria 4.0 utilizado como base para o presente trabalho e os princípios estruturantes do novo paradigma industrial. Em seguida, a seção 2.2 analisa as tecnologias fundamentais da Indústria 4.0, responsáveis por ampliar as capacidades técnicas do capital, possibilitando a consolidação dos princípios estruturantes a partir da forma como são inseridas à linha de produção e de como se relacionam às tecnologias já presentes. Este último processo é realizado a partir das tecnologias de interface, também discutidas na referida seção. À seção 2.3 cabe a discussão dos principais pontos de inflexão que garantem à Quarta Revolução Industrial seu caráter revolucionário, bem como abordar as novas relações de mercado que se desenham em termos do processo de cocriação de valor, que acarreta o surgimento de ecossistemas de inovação. A seção 2.4 examina os impactos do novo modelo produtivo sobre o trabalho, destacando os principais pontos de atenção advindos da automação irrestrita da produção sobre este fator. A seção 2.5, por fim, apresenta considerações preliminares a respeito do atingimento dos objetivos do presente trabalho a partir deste capítulo.

2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO, DEFINIÇÃO E PRINCÍPIOS

Conforme destaca Schumpeter em sua obra *Capitalismo, Socialismo e Democracia* (1942), o fator condicionante do desenvolvimento econômico ao longo do curso da história é o agregado dos interesses político-econômicos prevalecentes na sociedade. Embora seja, na visão do autor, a destruição criativa o aspecto fundamental que garante ao capitalismo características de alto dinamismo e adaptabilidade, a configuração de poder dentre os grupos sociais e a influência resultante dessa dinâmica dá forma e direcionamento ao progresso tecnológico, moldando a profundidade do impacto de novos paradigmas produtivos na economia. Delimitando-se então os aspectos teóricos pontuados para um nível de análise em

que se considere a “sociedade” em termos de sua projeção no Estado e incorporando-se a ela os produtos da interação entre a multiplicidade de atores que existiram/existem no cenário internacional, é possível destacar o interesse dos Estados em promover o avanço técnico endógeno para que possam fazer frente aos desafios postos pela configuração do sistema internacional (SCHUMPETER, 2003).

O progresso tecnológico ocorre no sentido de potencialização dos setores mais eficientes, que possuem, naturalmente, o apoio dos grupos econômicos e políticos mais influentes. Para além disso, essa decisão também acaba sendo sustentada pelos argumentos de: i) utilização eficiente dos recursos nacionais; e ii) amplificação do efeito multiplicador do setor que será beneficiado (FREY; OSBORNE, 2013; SCHUMPETER, 2003). A incorporação pioneira de novas tecnologias, portanto, pode ser encarada como um assunto estratégico para os Estados na busca pela ampliação de seus recursos de poder. Uma das mais recentes materializações desse fenômeno refere-se à Quarta Revolução Industrial ou Indústria 4.0. Este último termo foi trazido a público pela primeira vez em 2011 – *Industrie 4.0*, em sua alcunha original – pela Aliança de Pesquisa Indústria-Ciência (*Forschungsunion Wirtschaft-Wissenschaft*), principal órgão consultivo do governo alemão para fins de políticas de inovação, durante a tradicional feira de tecnologia industrial de Hannover (HORST; SANTIAGO, 2018).

Naquela ocasião, o conceito foi utilizado para se referir a uma nova fase de articulação dos recursos produtivos entre si e com os demais componentes da cadeia de valor – canais de venda, fornecedores, recursos logísticos, marketing, entre outros – de forma a integrar cada vez mais os ambientes físico e digital (KAGERMANN et al., 2016). A finalidade, bem como nos demais momentos históricos em que novas tecnologias alteraram o padrão industrial vigente, consiste na elevação da produtividade do capital investido (ORTIZ; MARROQUIN; CIFUENTES, 2020).

Contudo, devido à relativa nebulosidade que permeia o conceito (muitos dos conteúdos aos quais se refere não são ainda uma realidade palpável), o termo Indústria 4.0 possui diferentes conotações e até mesmo nomenclaturas dependendo do país em que se trata do assunto. Nos Estados Unidos da América (EUA), por exemplo, o tema é comumente tratado como Internet das Coisas, produção inteligente ou Internet Industrial. O foco nesse caso se dá de forma mais ampla, dando destaque também aos novos modelos de negócios que surgem em torno do novo padrão de organização produtiva, especialmente no setor de serviços, como é o caso de empresas especializadas na análise e no processamento de dados (KAGERMANN et al., 2016). Na China, o tema é deliberadamente utilizado pelo governo

para tratar de um dos principais pilares da estratégia de inserção definitiva do país dentre o grupo de economias desenvolvidas: aumento da produtividade de empresas estatais já consolidadas e ampliação de sua presença a nível global, bem como a inserção de um volumoso extrato de PMEs, que ainda não passaram por nenhum processo de automação, em uma cadeia de valor digitalizada. Outro aspecto tratado de forma conjunta na discussão sobre a transição para uma economia de matriz produtiva digitalizada no país é a ampliação de fontes de energia renovável para viabilizá-la (KAGERMANN et al., 2016).

Para fins do presente trabalho, o termo *Indústria 4.0* é utilizado fundamentalmente no sentido proposto por Carvalho e Cazarini (2020), sendo complementado a partir de outros referenciais, quando necessário, para que se possa alcançar maior compreensão a respeito do tema. O conceito faz referência a:

[...] um modelo avançado de fabricação que incorpora um extenso conjunto de tecnologias não necessariamente inéditas, mas integradas entre si e com toda a indústria, que se caracteriza por seu alto desempenho virtual, digital e tecnológico (CARVALHO; CAZARINI, 2020, p. 6, tradução nossa).

Adicionalmente a essa definição, os autores também elencam seis princípios estruturantes inerentes à Indústria 4.0. Este conjunto pode ser encarado como a descrição do novo paradigma industrial que o diferencia dos demais, estando presente no processo de “formatação ou transição de uma indústria comum, ou 3.0¹, para uma indústria 4.0” (CARVALHO; CAZARINI, 2020, p. 8, tradução nossa). Os referidos princípios são divididos em: descentralização, virtualização, interoperabilidade, modularidade, capacidade de resposta em tempo real e orientação a serviços. Vale pontuar que tais elementos fazem referência a capacidades técnicas do capital empregado na indústria como um todo, ou seja, implicam também o aprofundamento da interdependência de todos os atores envolvidos na cadeia de valor, desde a extração de matéria-prima, passando pelo fornecimento, transporte, beneficiamento e entrega ao consumidor final. Contudo, a elevação da autonomia do maquinário requer também uma reestruturação dos modelos organizacionais e de gestão de recursos nas companhias, inclusive, humanos (SCHUH et al., 2020).

¹ O termo remete à Terceira Revolução Industrial, ocorrida ao longo da segunda metade do Século XX e caracterizada pela implementação de tecnologias que criaram o domínio digital e a consequente conexão em rede da produção e da disseminação de informações a nível global, introduzindo também fontes de energia renovável. O computador e a internet são tidos como as principais tecnologias a viabilizarem o padrão de organização da produção, embora a informática, a microeletrônica, o robô, a biotecnologia e as tecnologias de telecomunicação informatizadas também façam parte da consolidação deste paradigma industrial (CARVALHO; CAZARINI, 2020).

O primeiro deles, a descentralização, contempla a capacidade de cada um dos componentes de uma empresa em tomar decisões por conta própria, sem que haja necessidade de uma estrutura hierárquica decisória que deve ser percorrida para que seja definida a ação a ser executada. A soma de diversos componentes autônomos garante, em última instância, a autonomia decisória da própria empresa em todos os seus processos, que passam a ser mais estruturados tanto em sua própria delimitação quanto em sua integração frente aos demais. Ressalta-se que o princípio de descentralização não se refere apenas às máquinas, mas também às pessoas que integram as cadeias produtivas na Indústria 4.0, que adquirem maior capacidade de autogestão e liberdade para intervir de forma qualificada quando julgarem oportuno (CARVALHO; CAZARINI, 2020).

A virtualização, por sua vez, refere-se ao monitoramento e a comunicação irrestrita entre as centrais de processamento de dados – computadores – integradas à cadeia produtiva. Em termos práticos, consiste na criação de uma cópia virtual do mundo físico a partir da coleta, armazenamento e processamento de um volume massivo de dados que permite a simulação das condições de operação da planta fabril dada a alteração das condições em que se encontra. Dessa forma, faz com que adversidades relacionadas ao abastecimento de insumos, ao reparo de equipamentos, à utilização de energia, a atrasos logísticos e mesmo a intempéries possam ser antecipados e prontamente endereçados em termos de adaptação operacional (CARVALHO; CAZARINI, 2020).

Em seguida, a interoperabilidade descreve a característica apresentada pela nova indústria com relação à conectividade funcional e articulada de todos os agentes da cadeia de valor. Componentes da linha de montagem interagem com centrais de armazenamento e processamento fornecendo dados e recebendo informações relevantes que sustentam o processo decisório autônomo, dando forma a sistemas integrados de manufatura (CARVALHO; CAZARINI, 2020). Estes são também integrados verticalmente ao comando dos diferentes ramos de negócio que compõem a indústria, fornecendo informações relevantes para a tomada de decisões estratégicas por parte dos executivos, e horizontalmente à cadeia de valor como um todo, trocando informações com sistemas de fornecedores, canais de venda e operadores logísticos (CARVALHO; CAZARINI, 2020; DALENOGARE et al., 2018). O conceito de interoperabilidade também compreende a compatibilidade do trabalho conjunto entre humanos e máquinas.

Outro dentre os considerados princípios de formulação do novo paradigma industrial, a modularidade corresponde à noção de linhas de beneficiamento compostas por unidades – módulos – compatíveis e flexíveis, capazes de operar a partir de diferentes disposições em

termos de alocação do espaço físico para si e para as demais e da quantidade de módulos envolvidos (CARVALHO; CAZARINI, 2020). Dessa forma, a resposta das indústrias a alterações mais ou menos drásticas dos níveis de oferta e demanda, do comportamento do consumidor, da taxa de câmbio, ou quaisquer outras variáveis que possam impactar a rentabilidade da produção, é dada mediante a minimização de erros, atrasos e perdas de produtividade (DALENOGARE et al., 2018).

O quinto princípio, a capacidade de resposta em tempo real, determina, intuitivamente, a aptidão dos sistemas compostos por máquinas e *softwares* em ajustarem o processo autônomo de decisão tão logo identifiquem a necessidade para isso. Este aspecto garante a constante permanência do nível de produtividade industrial na fronteira ótima dadas as condições internas e externas à indústria através do “compartilhamento, recebimento e análise de dados e informações em tempo real” (CARVALHO; CAZARINI, 2020, p. 9, tradução nossa), consequentemente reduzindo o uso ineficiente de recursos, o desperdício e elevando a eficiência energética.

Por fim, a orientação a serviços diz respeito à capacidade de geração de informações úteis condizentes com as necessidades de cada uma das partes interessadas no processo produtivo – *stakeholders*, na definição em inglês, grupo composto por consumidores, executivos, fornecedores, acionistas, credores, entre outros. A disponibilidade das informações ocorre de forma condizente a cada uma das categorias, podendo ser interna e/ou externa ao ambiente empresarial, com vistas à ampliação do conhecimento do usuário a respeito de seu objeto de interesse, que vai desde o produto vendido até a performance industrial (CARVALHO; CAZARINI, 2020).

2.2 TECNOLOGIAS E RECURSOS TÉCNICOS

Caracterizados os conceitos teóricos a respeito dos atributos verificados na Indústria 4.0, cabe agora analisar o conjunto de tecnologias-base responsáveis pela viabilização das diretrizes observadas. Nesse sentido, Pacchini et al. (2019) identificam um conjunto de oito recursos tecnológicos requeridos para que se possa realizar uma implementação adequada do novo paradigma industrial: Internet das Coisas (*Internet of Things*, IoT), *Big Data*, Computação em Nuvem, Sistemas Ciber-Físicos, Robôs Autônomos, Manufatura Aditiva, Realidade Aumentada e Inteligência Artificial (IA). Todos os recursos técnicos listados corroboram com aquele que é o objetivo primordial da Quarta Revolução Industrial: a integração dos mundos físico e digital, a partir da incorporação a objetos de dispositivos

capazes de coletar e transferir dados provenientes da esfera material para a esfera virtual, para serem então processados, transformados em informação e finalmente serem utilizados na definição da ação a ser tomada na realidade material (SCHWAB, 2016; FRANK; DALENOGARE; AYALA, 2019; DALENOGARE et al., 2018).

A IoT é a tecnologia responsável pelo estabelecimento da interconectividade entre máquinas, aparelhos e dispositivos móveis em rede integrada a partir de sensores sem fio, possibilitando o controle remoto das funcionalidades de cada componente nela inserido. Cabe destacar que o alcance da referida interoperabilidade pode ser interno ou externo às empresas (PACCHINI et al., 2019; FRANK; DALENOGARE; AYALA, 2019). Não obstante, a presença de sensores também habilita o constante monitoramento de rotinas e posterior coleta de dados gerados a partir da operação da planta industrial, tornando esses procedimentos amplamente difundidos em todas as etapas do processo produtivo. O *Big Data*, é, por sua vez, um recurso técnico que surge fortemente ligado a esse exponencial aumento da disponibilidade de dados, uma vez que consiste na consolidação de um ambiente capaz de recolher uma quantidade massiva destes, provenientes de inúmeros dispositivos conectados em rede (IoT), armazená-los de forma segura e processá-los de forma ágil para sustentar decisões mais condizentes à realidade. Os maiores desafios para a aplicação do conceito, atualmente, se encontram nas duas últimas etapas do processo descrito (BRYNJOLFSSON, E; MCAFEE, 2011; SANTAELLA; GALA; POLICARPO; GAZONI, 2013).

A Computação em Nuvem, de forma semelhante, é um desdobramento da conectividade alcançada por meio da IoT. Corresponde ao acesso remoto e altamente responsivo a dados armazenados em ambiente externo ao local de acesso (PACCHINI et al., 2019; FRANK; DALENOGARE; AYALA, 2019). Dessa forma, facilita a integração de diferentes dispositivos e possibilita a centralização e uniformização dos dados fornecidos aos usuários – humano ou máquina –, garantido que o processo descentralizado e autônomo de tomada de decisão ocorra sob os mesmos parâmetros (FRANK; DALENOGARE; AYALA, 2019). Tal particularidade, por sua vez, acarreta a redução da incidência de interpretações equivocadas e assegura a compatibilidade entre as ações adotadas.

Mediante a incorporação das tecnologias até aqui descritas ao ambiente material da indústria, tem-se a consolidação dos Sistemas Ciber-Físicos, que nada mais são do que a operação conjunta e coordenada – sistematizada – dos recursos físicos e digitais de uma indústria, garantindo a interoperabilidade dos componentes em uma mesma empresa e mesmo entre empresas de uma mesma indústria (SCHUH et al., 2020). Sua concepção é dada com base no aprimoramento dos módulos produtivos, que passam a contar com sistemas

embutidos próprios, compostos por sensores, atuadores², controladores lógicos programáveis³ (CLPs) e unidades de processamento de informações, capazes de se integrar totalmente a ambientes de características semelhantes (JESCHKE, 2016). Uma vez estabelecidos, os Sistemas Ciber-Físicos são capazes de criar uma réplica digital da planta produtiva, descrita como *Digital Twin* (Gêmeo Digital, tradução nossa). A coleta de dados em tempo real ao longo de toda a cadeia fabril, possibilitada pelos sistemas embutidos acoplados às máquinas, e a aplicação de modelos estatísticos tornam possível o monitoramento integral da estrutura industrial e elevam sua capacidade preditiva, fazendo com que qualquer alteração nas condições atuais possa ser endereçada de forma ótima antes mesmo de acontecer (SCHUH et al., 2020). Em resumo, a finalidade dos Sistemas Ciber-Físicos é viabilizar a maximização da eficiência dos recursos utilizados no processo produtivo.

Outrossim, a robótica avançada tem sido capaz de criar módulos cada vez mais adaptáveis e flexíveis. Robôs Autônomos, embora ainda não tenham atingido o grau de maturidade de seu desenvolvimento técnico, tendem a ser cada vez mais integrados tanto à rotina industrial, substituindo o trabalho humano empregado na produção ou atuando de forma complementar a este, quanto à realidade do consumidor, a partir da oferta de serviços automatizados relacionados ao transporte, a investimentos e a procedimentos cirúrgicos, por exemplo (ORTIZ; MARROQUIN; CIFUENTES, 2020). Fatores que têm contribuído para o desenvolvimento de robôs mais versáteis são os processos de concepção estrutural e operacional inspirada em princípios biológicos e de aprendizado com base no acesso a dados armazenados em nuvem, coletados a partir das rotinas desempenhadas por outros dispositivos (SCHWAB, 2016).

A sexta das tecnologias citadas, a Manufatura Aditiva, também conhecida como técnica de impressão 3D, consiste na produção de objetos a partir da deposição da matéria-prima camada sobre camada (PACCHINI et al., 2019). O processo é iniciado a partir da elaboração de um modelo digital do produto a ser fabricado, que é então segmentado através de softwares específicos para que sejam criadas as instruções de produção. Tal técnica agrega um alto nível de customização dos produtos ao processo produtivo e, em oposição ao método de manufatura subtrativa⁴ amplamente difundido entre os paradigmas industriais

² Dispositivos que compõem sistemas de automação, são projetados para executar determinado movimento mediante um estímulo mínimo necessário (MAGNA CAMPOS, 2016).

³ Equipamentos eletrônicos também verificados em sistemas de automação, são responsáveis pelo controle e monitoramento de outros aparelhos. Conectados a computadores, possuem interface para possibilitar a interação humana, sendo possível alterar seus parâmetros de funcionamento por meio da aplicação de diferentes rotinas lógicas (MAGNA CAMPOS, 2016).

⁴ Método de fabricação utilizado até a Terceira Revolução Industrial que consiste na concepção do produto final a partir da fragmentação parcial e coordenada de um bloco único de matéria-prima (NISHIMURA et al., 2016).

anteriores, implica a diminuição do nível de desperdício (PACCHINI et al., 2019; AHUETT-GARZA; KURFESS, 2018).

O estágio atual de aplicação prática da Manufatura Aditiva não atingiu ainda um grau compatível com a produção em massa, estando por isso bastante ligada a áreas cuja demanda por grandes volumes é baixa, mas que envolve a configuração de estruturas complexas (AHUETT-GARZA; KURFESS, 2018). Os exemplos mais ilustrativos dessa realidade são ligados à indústria médica, a partir do desenvolvimento de implantes dentários, próteses e órteses. Outra limitação verificada para a tecnologia em questão é referente a características dos materiais passíveis de utilização no processo de fabricação: o requisito de maleabilidade é geralmente atendido em detrimento de outros atributos importantes dependendo da aplicação do produto, como resistência e rigidez (AHUETT-GARZA; KURFESS, 2018). Destarte, os avanços observados na área de engenharia de materiais condicionarão em grande parte o avanço da própria Manufatura Aditiva.

A Realidade Aumentada é uma tecnologia bastante voltada à utilização humana. Sua finalidade é expandir a disponibilidade de informações ao alcance da percepção do usuário, fazendo com que possa interagir com representações virtuais de estruturas e objetos físicos sem a sua presença material. Tal recurso pode ser bastante explorado no ambiente industrial a partir de sua implantação em treinamentos dados aos trabalhadores e em rotinas remotas de manutenção (VAIDYA; AMBAD; BHOSLE, 2018; PACCHINI et al., 2019). Por fim, a IA, última das tecnologias-base elencadas, é estruturada a partir da aplicação de um conjunto de outros recursos técnicos para que o processo de representação, racionalização e gerenciamento do conhecimento seja feito de forma autônoma por sistemas de processamento de dados (PACCHINI et al., 2019). Para serem qualificados inteligentes, estes precisam ser aptos a identificar as características do ambiente no qual estão inseridos, levá-las em consideração no cálculo para definir o conjunto de ações a serem tomadas com vistas ao atingimento do objetivo predeterminado e, então, decidir em tempo real qual a melhor decisão a ser tomada (CHUN; KIM; LEE, 2018; PACCHINI et al., 2019). A IA é comumente aplicada a dispositivos, em especial a robôs, devido à automatização e autonomia que confere à funcionalidade desses aparelhos. Outro dos atributos que permeiam essa tecnologia é a capacidade de aprendizado por conta própria a partir de modelos estatísticos, processo conhecido como *Machine Learning* (aprendizado de máquina) (CHUN; KIM; LEE, 2018).

De forma complementar às tecnologias-base retratadas até aqui, Frank, Dalenogare e Ayala (2019) elencam um segundo conjunto de recursos técnicos particulares da Quarta Revolução Industrial. O grupo é composto por tecnologias de interface (*Front-End*), sendo

estas totalmente viabilizadas pelos componentes anteriores. A denominação *interface* remete ao fato de todas estarem ligadas a necessidades operacionais e de mercado da indústria, de maneira que definem a disposição, a interação e, especialmente, o papel das tecnologias-base ao longo da cadeia produtiva, concedendo a esta o aspecto “inteligente” intrínseco à Indústria 4.0 (FRANK; DALENOGARE; AYALA, 2019). São elas: i) a Manufatura Inteligente, que engloba a transformação das atividades de fabricação a medida que o avanço no desenvolvimento das tecnologias-base permite sua integração à estrutura produtiva; ii) o Produto Inteligente, que descreve a incorporação das tecnologias-base ao produto final e a forma como isso expande sua aplicabilidade e afeta os métodos de comercialização utilizados; iii) a Cadeia de Fornecimento Inteligente, dimensão que considera a troca de informações e a integração verificada ao longo da cadeia de suprimento de matérias-primas; e iv) o Trabalho Inteligente, cuja aplicação diz respeito à adaptação do trabalho humano em função da nova configuração da produção (FRANK; DALENOGARE; AYALA, 2019).

A fim de que se estabeleça uma relação clara entre os conceitos tratados até aqui, cabe salientar os pontos de aproximação entre eles antes que tratemos das tecnologias de interface em maior profundidade. Os princípios estruturantes, conforme trazido na seção 2.1, definem o paradigma da nova indústria, ou seja, descrevem o modelo de atributos que devem ser verificados na estrutura produtiva para que se possa classificá-la como 4.0 (CARVALHO; CAZARINI, 2020). As tecnologias-base, por sua vez, são os recursos tecnológicos fundamentais responsáveis por ampliar tanto a performance de execução quanto a quantidade de tarefas capazes de ser operacionalizadas pelo capital produtivo de forma específica e segmentada (FRANK; DALENOGARE; AYALA, 2019; PACCHINI et al., 2019). Complementarmente, pode-se dizer que as tecnologias de interface definem a forma como as tecnologias-base interagirão entre si e com as tecnologias já estabelecidas na linha de produção para que, dessa forma, os princípios estruturantes sejam materializados. Se imaginássemos a composição da Indústria 4.0 a partir de uma estrutura de sistemas de equações figurativas, as tecnologias-base seriam os termos das equações, as tecnologias de interface, as operações matemáticas entre os termos, e os princípios, os resultados ou variáveis dependentes.

Isto posto, passa-se a analisar as sobre as tecnologias de interface. A primeira delas, a Manufatura Inteligente, determina a forma como as tecnologias-base integram o processo de fabricação e, por isso, é considerada a principal tecnologia de interface para a implementação da Indústria 4.0 (FRANK; DALENOGARE; AYALA, 2019). Um dos princípios estruturantes discutidos na seção 2.1 e concretizados parcialmente pela tecnologia de interface em questão

é a interoperabilidade. O termo “parcialmente” é utilizado porque, aqui, refere-se exclusivamente à integração vertical dos diferentes níveis hierárquicos de uma companhia, sem considerarmos o eixo de integração horizontal ao qual o princípio também faz referência. Nesse sentido, para que se alcance tal estágio de maturidade industrial, é necessária a instalação de componentes que permitam a digitalização e a coleta de dados por parte de todos os objetos no chão de fábrica (sensores, atuadores e CLPs) (FRANK; DALENOGARE; AYALA, 2019).

O volume de dados gerado é então tratado por classes distintas de sistemas avançados de TICs⁵ que atuam sob três óticas distintas, quais sejam, o controle e o diagnóstico de performance da linha de produção, o monitoramento da transformação de insumos em produtos acabados e o acompanhamento do nível de produção (ALMAJALI; MASA'DEH; TARHINI, 2016). O controle dessas etapas é realizado sempre em relação ao ambiente empresarial como um todo, a partir do acompanhamento cruzado frente aos recursos da companhia – caixa, matéria-prima, utilização da capacidade instalada – e aos seus direitos e compromissos – fluxo de recebimento de clientes, ordens registradas, fluxo de pagamento a fornecedores e funcionários. Uma vez completa a integração nessas três camadas, o fluxo de informações passa a ocorrer não apenas de baixo para cima, mas também no sentido inverso, em que a análise da situação atual da empresa como um todo gera conclusões para coordenar o processo produtivo (FRANK; DALENOGARE; AYALA, 2019).

Outro dos princípios da Indústria 4.0 viabilizado pela Manufatura Inteligente é a virtualização. A partir da conexão em rede dos diversos dispositivos da linha de produção mediante a implementação da IoT, as unidades de processamento de dados passam a ser capazes de interagir entre si, obtendo informações às quais não teriam acesso caso sua única fonte de obtenção de dados fossem os componentes com os quais estão diretamente conectadas (DALENOGARE et al., 2018). Esse processo expande a capacidade de compreensão dos computadores a respeito do ambiente em que se inserem, possibilitando a simulação dos efeitos de diferentes variáveis sobre a linha de produção, o que torna as máquinas mais adaptáveis, inclusive, a diferentes disposições dos componentes ao longo da cadeia produtiva (AHUETT-GARZA; KURFESS, 2018). Os códigos de CLPs presentes em equipamentos ainda a serem incorporados à estrutura produtiva podem ser reproduzidos previamente, passando a integrar sua rotina virtual, o que reduz drasticamente o tempo de inatividade da planta quando da incorporação física do novo aparelho (FRANK;

⁵ Toda tecnologia cujo propósito final envolva a geração, coleta, manipulação, interpretação, transmissão ou apresentação de um determinado volume de informações (PEREIRA; SILVA, 2020).

DALENOGARE; AYALA, 2019). Este processo, por sua vez, consiste na materialização do princípio da modularidade.

Uma tecnologia-base bastante atuante no conceito de Manufatura Inteligente é a IA. Uma vez verificada a dispersão, por toda a fábrica, de dispositivos de coleta de dados e unidades de processamento de informação capazes de analisá-las, a habilidade de derivar conclusões alcançadas a partir disso eleva expressivamente a automação do processo produtivo (CHUN; KIM; LEE, 2018), além de representar o grau máximo de maturidade do sistema ciber-físico (FRANK; DALENOGARE; AYALA, 2019). Rotinas de manutenção passam a ter uma periodicidade mais condizente com as necessidades técnicas, o controle de qualidade dos produtos é otimizado à luz da destinação imediata de itens cujas características se encontram fora dos padrões preestabelecidos, a produção é conduzida em função dos níveis de estoque e fornecimento e a intensidade de utilização da planta pode ser coordenada de acordo com a disponibilidade de energia (FRANK; DALENOGARE; AYALA, 2019). Em suma, a estrutura produtiva adquire a capacidade de responder imediatamente e ao longo de toda a sua extensão a estímulos gerados por conta própria ou pela alteração de variáveis externas, o que garante a sustentação de uma sequência de processos de alta complexidade e, assim, estabelece os princípios de capacidade de resposta em tempo real e descentralização.

Por outro lado, o Produto Inteligente engloba a incorporação de componentes ao produto final que proporcionem a ampliação das funcionalidades destes e a oferta de serviços digitais integrados. Sendo assim, os produtos passam a contar com aditivos tecnológicos também verificados na própria planta industrial, como sensores e *softwares* conectados a serviços de nuvem que permitem seu controle de forma remota e integrada a outros aparelhos (FRANK; DALENOGARE; AYALA, 2019). Contando também com capacidade de processamento de informações e IA, serão capazes de otimizar seu funcionamento de forma autônoma e indicar ao usuário as melhores práticas para seu manuseio. Outrossim, a mencionada presença de sensores oportuniza aos fabricantes o monitoramento da utilização dos produtos pelos consumidores, processo através do qual obtêm informações relevantes para o desenvolvimento de novos modelos e mesmo para direcionar a oferta dos serviços digitais aos quais o usuário possui acesso (FRANK; DALENOGARE; AYALA, 2019). Portanto, a tecnologia de interface em questão tem como principal vertente a implementação do princípio de orientação a serviços do novo paradigma industrial, apesar de também expandir a extensão de abrangência dos princípios de interoperabilidade e virtualização.

A Cadeia de Fornecimento Inteligente se refere à consolidação da integração horizontal da indústria, completando assim a incorporação do princípio de interoperabilidade

verificado inicialmente à luz da Manufatura Inteligente. Isso ocorre a partir do “intercâmbio de informações em tempo real sobre as ordens de produção [da fábrica] com fornecedores e centros de distribuição” (FRANK; DALENOGARE; AYALA, 2019, p. 18, tradução nossa). Novamente, a tecnologia de computação em nuvem se faz imprescindível para estruturar o processo em questão, colocando-se como uma plataforma de concentração de informações relevantes que podem ser facilmente acessadas por qualquer uma das partes envolvidas. Assim, o rastreamento de bens passa a ocorrer de forma precisa, colaborando para a manutenção de níveis ótimos de estoques, para a identificação imediata de rupturas e para a consideração das condições climáticas na determinação do momento ideal de entrega (FRANK; DALENOGARE; AYALA, 2019). Claramente, verificam-se traços dos princípios de descentralização, virtualização e capacidade de resposta em tempo real nos processos citados.

A tecnologia de Trabalho Inteligente, por fim, endereça o papel da mão de obra humana em um ambiente industrial altamente digitalizado e autônomo. Na prática, isso implica a elevação da produtividade desse fator, seja por meio da realização de tarefas com o auxílio de recursos tecnológicos ou por meio do acesso à informação (SCHUH et al., 2020). A disponibilidade de ferramentas virtuais, como recursos de realidade aumentada e bases de dados ampliam a capacidade de intervenção e de tomada de decisão do trabalho humano, enquanto a atuação em conjunto com robôs de colaboração eleva a precisão e a velocidade das tarefas executadas. O objetivo final se resume à redução máxima da realização de atividades que pouco agregam valor à produção por meio do trabalho humano, fazendo com que seu foco seja no desempenho de tarefas cuja flexibilidade demandada esteja além da capacidade de compreensão das máquinas (FRANK; DALENOGARE; AYALA, 2019). Por intermédio desta tecnologia de interface, encontra-se contemplado o princípio de descentralização.

O estudo de Frank, Dalenogare e Ayala (2019) identifica também alguns padrões de adoção das tecnologias de interface. Naturalmente, assim como indicado em outras literaturas a respeito do tema, percebe-se uma correlação muito forte entre o tamanho das empresas e o nível de implementação das tecnologias relacionadas à Indústria 4.0 (SCHWAB, 2016; SCHUH et al., 2020). Grandes companhias possuem maior capacidade de sustentação dos custos e de mitigação dos riscos envolvidos em projetos desse gênero, sendo pioneiras no acesso a novas tecnologias.

Ademais, o avanço na adoção das tecnologias-base e de interface é verificado de forma conjunta, de modo que a complementaridade e os ganhos de sinergia obtidos parecem ser aspectos necessários à consolidação da Indústria 4.0 *ex-ante*, e não apenas ganhos

verificados *ex-post*. Contudo, as linhas flexíveis de produção são pouco priorizadas pelos agentes envolvidos na cadeia produtiva. Tal fato pode ser reflexo do contexto socioeconômico em que se inserem, visto que empresas em economias emergentes costumam adotar a redução de custos como principal meio para ampliar o retorno de seus investimentos, estratégia que apresenta resultados mais rápidos em relação à reestruturação das linhas de produção. Outra possibilidade levantada é de que haja uma resistência subjetiva à adoção dessa tecnologia, a partir da qual os executivos das empresas enxergam tal etapa como uma das mais avançadas e, portanto, requeiram avanço pleno em outras áreas para ser implementada (FRANK; DALENOGARE; AYALA, 2019).

Outra relação pertinente diz respeito à ligação entre as tecnologias de Produto Inteligente e Manufatura Inteligente: companhias que apresentem alto grau de maturidade com relação à primeira apresentarão, impreterivelmente, alto nível de avanço de implementação da segunda. A mesma relação, no entanto, não é claramente observada para as duas tecnologias de interface restantes – Cadeia de Fornecimento Inteligente e Trabalho Inteligente – em função de sua implementação ser ainda incipiente mesmo entre as empresas mais avançadas (FRANK; DALENOGARE; AYALA, 2019). Hipóteses para justificar a ocorrência desse atraso relativo podem ser atribuídas à maior complexidade no estabelecimento de uma Cadeia de Fornecimento Inteligente no sentido de coordenação entre as capacidades próprias das empresas e as de agentes terceiros, além de partir do pressuposto de que estes também já tenham implementado as novas tecnologias relativas à Indústria 4.0. Quanto ao Trabalho Inteligente, a grande nebulosidade que envolve o papel humano na linha de produção pode ser um fator de desestímulo à realização de investimentos nessa área (FRANK; DALENOGARE; AYALA, 2019). Assim, é preferível a espera pelo alcance de maiores níveis de maturidade nos demais eixos do novo paradigma industrial para que se possa realizar a destinação de recursos de forma mais precisa.

Da mesma forma como se verifica o pioneirismo da principal tecnologia de interface – a Manufatura Inteligente – frente às demais, essa mesma relação é constatada entre as tecnologias-base e ela. Sendo assim, a presença em quantidade e amplitude das tecnologias fundamentais será mais forte o quão mais desenvolvida for a Manufatura Inteligente de uma companhia (FRANK; DALENOGARE; AYALA, 2019). Aqui, cabe salientar algumas particularidades identificadas na qualificação do progresso tecnológico. Há uma tendência de adoção passiva do conceito “Inteligente” por parte das empresas em estágios iniciais, fazendo com que as tecnologias empregadas na operação atendam mais aos objetivos de controle e monitoramento do que de otimização das rotinas de funcionamento das máquinas (autonomia)

(FRANK; DALENOGARE; AYALA, 2019). Outro fato que sustenta essa afirmação relaciona-se à alta difusão da tecnologia de nuvem, por vezes, de forma isolada. Isso pode ser encarado como um indício de que o papel que tem sido designado para este recurso técnico está mais ligado ao armazenamento externo de dados e ao acesso remoto do que ao estabelecimento de um sistema que possibilite a conexão entre os equipamentos e a propagação de informações ao longo de toda a linha de produção. Outrossim, plataformas para a integração com fornecedores e clientes ainda foram pouco implementadas, bem como a aplicação de recursos de realidade aumentada e virtual (FRANK; DALENOGARE; AYALA, 2019).

2.3 INDÚSTRIA 4.0: INFLEXÃO E ECOSISTEMAS DE INOVAÇÃO

Fornecido o arcabouço teórico que embasa a identificação de um quarto período no desenvolvimento histórico da indústria, cabe agora sustentar os argumentos que determinam tal separação ante o período anterior. Partindo de um escopo amplo de análise para tratar do tema, Schwab (2016) elenca como pontos de inflexão para atribuir o caráter revolucionário ao novo paradigma industrial o grau de fusão verificado entre as TICs convencionais (computadores, internet, rede) – incorporação destas ao ambiente da IoT em conjunto com as máquinas para consolidar os sistemas ciber-físicos – e a interação irrestrita entre os mundos físico e digital, proporcionada pelo arranjo descrito (DALENOGARE et al., 2018). Os impactos dessas premissas sobre o desenvolvimento industrial são então classificados em três fatores. O primeiro deles é a velocidade do progresso tecnológico, tida pelo autor como linear nas eras industriais anteriores, em contraposição ao ritmo exponencial que caracteriza a Indústria 4.0 (SCHWAB, 2016). Devido ao alto grau de integração verificado junto aos recursos técnicos, avanços em um segmento específico resultam em um efeito multiplicador maior.

Em seguida, são trazidas a amplitude e a profundidade dos impactos advindos das novas diretrizes de organização produtiva: é vislumbrada uma irradiação maior para outras esferas da sociedade (Estados, política, instituições, indivíduos) em relação aos períodos passados (SCHWAB, 2016). A criação de um ambiente digital cada vez mais complexo e próximo da realidade física em termos de acessibilidade e possibilidades expande tanto a oportunidade de criação de novos negócios e de acesso a novos produtos quanto a necessidade de regulação por parte de autoridades competentes. Ademais, a virtualização das relações sociais incorpora a figuração inédita da interlocução entre humanos e equipamentos

artificialmente inteligentes, bem como constitui uma nova esfera para a condução das relações internacionais (SCHWAB, 2016). O último fator elencado pode ser interpretado como um desdobramento do anterior: devido às mudanças amplamente dispersas sobre as diversas áreas da sociedade, conforme pontuado, tudo indica que a Quarta Revolução Industrial terá um impacto sistêmico sobre a sociedade a nível global (SCHWAB, 2016).

Sob uma ótica distinta, Benitez, Ayala e Frank (2020) destacam o novo padrão de desenvolvimento de soluções relativas aos produtos e à cadeia de valor verificado a partir da Quarta Revolução Industrial. Tal processo ocorria até então a partir da contribuição individual dos atores envolvidos na cadeia de valor com módulos de tecnologia elaborados separadamente de outras partes que demandariam, ao fim, um processo de integração para compor as linhas de produção ou de fornecimento. Ainda, a transação monetária era a base sob a qual se dava o avanço técnico na cadeia produtiva (BENITEZ; AYALA; FRANK, 2020). Com o advento da Indústria 4.0, contudo, o pressuposto de conectividade completa entre todos os elementos da estrutura produtiva passou a demandar um alto grau de compatibilidade entre os recursos técnicos. Esta, no âmbito do novo paradigma industrial, é alcançada por meio da implantação de um modelo baseado na cocriação, em detrimento do anterior, que ocorria sob a ótica transacional. Naturalmente, esta troca acarreta mudanças na forma como os atores se relacionam, reconfigurando-se a estrutura linear da cadeia de fornecimento convencional em favor da criação de ecossistemas de inovação (BENITEZ; AYALA; FRANK, 2020).

Tais ambientes têm surgido por serem configurações mais adequadas à mitigação dos riscos e à redução dos custos do avanço tecnológico rumo ao estabelecimento da Indústria 4.0. O principal fator a determinar o aumento significativo da complexidade em termos de expansão da fronteira tecnológica por parte dos agentes econômicos é a alta integração tecnológica demandada. Até então, nos demais estágios industriais, o desenvolvimento de novas tecnologias ocorria de forma majoritariamente isolada, a partir do domínio da utilização de ferramentas – mesmo digitais – e da aplicação de métodos bem definidos (BENITEZ; AYALA; FRANK, 2020). Com o novo paradigma industrial, além dessa primeira etapa, é necessário dominar a tecnologia resultante e também torná-la completamente operacional, reduzindo a margem para a ocorrência de erros a um nível ótimo ou próximo disso, para só então avançar rumo à etapa de integração. Esta consiste no estágio mais complexo da cadeia de desenvolvimento, uma vez que a compatibilidade entre as tecnologias pode não ser verificada logo na primeira tentativa, sendo então necessário retroceder às fases iniciais para que se realizem ajustes (BENITEZ; AYALA; FRANK, 2020).

A fim de que se possa aumentar as taxas de acerto verificadas em projetos dessa natureza, portanto, a consolidação dos ecossistemas de inovação ocorre a partir da associação de agentes com diferentes especialidades. Estas podem ser relativas ao gerenciamento de produção, desenvolvimento de *hardware* e *software*, estruturação de redes de comunicação ou manipulação de dados, sendo aptidões que devem apresentar um alto grau de maturidade por parte dos agentes que as possuem para que o processo de desenvolvimento tecnológico possa ocorrer em um ritmo que sustente a competitividade dos envolvidos e reduza as possibilidades de abandono do projeto. Ademais, o objetivo que promove a união do grupo de agentes pode estar relacionado ao desenvolvimento de novas tecnologias, a atividades de P&D, ao apoio através da implementação de políticas ou a mais de um destes. Para essas finalidades, pode-se atribuir um setor específico composto por agentes indicados para levar a cabo cada uma delas, quais sejam, o setor privado, a academia e o governo (BENITEZ; AYALA; FRANK, 2020).

No estudo apresentado por Benitez, Ayala e Frank (2020), quatro elementos de troca social são responsáveis por definir os estágios de avanço do ecossistema de inovação. São eles a confiança, o comprometimento, a reciprocidade e a estrutura de poder. Os autores destacam o papel de centralidade da confiança nesse processo, uma vez que o comprometimento, a reciprocidade e a estrutura de poder progridem conforme a confiabilidade dos agentes se consolida e se torna mais difundida. Este elemento segue um percurso de foco em instituições, passando para uma concentração nos times de projetos intercompanhias consolidados no ecossistema e encontrando seu grau máximo de maturidade a partir do foco nas novas soluções criadas, não apenas em termos de tecnologias isoladas, mas também dos sistemas de gerenciamento que estruturam a integração das tecnologias e das novas oportunidades de negócio que se colocam (BENITEZ; AYALA; FRANK, 2020). Quanto mais os atores estiverem confiantes no processo, maior a autonomia e a dinamicidade dos ecossistemas de inovação.

Dessa forma, inicialmente, é preciso que seja criada uma estrutura de poder com credibilidade suficiente para permitir uma interação positiva entre os agentes. Nesse momento, é bastante relevante o papel das instituições governamentais na definição de uma governança que definirá a forma de acesso a recursos, informação e conhecimento, objetivo preliminar da associação (BENITEZ; AYALA; FRANK, 2020). A presença do governo torna-se gradativamente menor conforme maiores estágios de maturidade vão sendo atingidos. A disposição final da estrutura de poder ocorre a partir do desenvolvimento completo da solução tecnológica criada pelo ecossistema, em que os agentes envolvidos passam a coordenar seus esforços em torno da difusão do produto/serviço final no mercado e mesmo

para o desenvolvimento de novos modelos de negócio que o utilizem como peça fundamental. Por outro lado, o comprometimento em estágios iniciais tende a ser oportunista, sendo a principal intenção das partes a obtenção de recursos – sejam eles financeiros, informacionais, tecnológicos – mediante o emprego da menor quantidade de esforço possível. Seu crescimento está diretamente relacionado à percepção do valor gerado a partir da interação entre os agentes, sendo, em estágios finais de desenvolvimento, impulsionado pela demanda de mercado aos novos produtos/serviços criados no âmago do ecossistema de inovação (BENITEZ; AYALA; FRANK, 2020).

Ademais, a materialização dos benefícios advindos desse arranjo, além de seus efeitos práticos imediatos, amplia a perspectiva de novos ganhos por parte dos agentes. Esse processo faz com que o interesse dos agentes no projeto seja mantido através do aprofundamento da reciprocidade, que se forma inicialmente em torno de um interesse pragmático de obtenção de benefícios (redução dos custos de acesso a recursos de inovação, sejam eles de gestão, plataformas, sistemas) especialmente a partir da presença de instituições públicas e da academia (BENITEZ; AYALA; FRANK, 2020). Em seguida, com o avanço da capacidade de desenvolvimento de soluções tecnológicas verificada internamente ao ecossistema, passa a ser fundamentada pelos “benefícios técnicos mútuos devido aos efeitos sinérgicos da junção das capacidades” (FRANK; DALENOGARE; AYALA, 2019, p. 9, tradução nossa). Isso ocorre tanto a partir do acesso às criações do ambiente em questão, quanto da aplicação de componentes específicos na operação individual de cada agente. O estágio final do referido elemento de troca social é alcançado por meio da consolidação da funcionalidade das soluções tecnológicas do ecossistema, fazendo com que os agentes atuem de forma conjunta na busca pela expansão das oportunidades de mercado para todos os envolvidos (BENITEZ; AYALA; FRANK, 2020).

Conforme o ecossistema evolui, verifica-se o aprofundamento do processo de servitização das soluções criadas. A partir da completa operacionalização dos recursos técnicos a serem comercializados, sua consolidação em um produto final sob a ótica de serviços, total ou parcialmente, configura o aspecto da Nova Revolução Industrial que faz com que os custos das empresas inseridas no paradigma digital tendam a zero (SCHWAB, 2016). Nesses casos, os agentes também utilizarão seus recursos de coleta, processamento e armazenagem de dados para serem ofertados ao consumidor embutidos em um produto físico ou então como produtos separados. Dessa forma, novas oportunidades de negócio surgem a partir da venda de espaços de armazenagem de informações em nuvem, de treinamentos a serem realizados digitalmente, do monitoramento dos produtos finais ou mesmo da

disponibilização de conteúdos digitais pagos com base em assinaturas, no período de utilização ou nos resultados obtidos (BENITEZ; AYALA; FRANK, 2020).

Atendo-se mais ao âmbito industrial *stricto sensu*, Popkova, Ragulina e Bogoviz (2018) estabelecem um modelo conceitual para identificar os pontos de convergência entre as três revoluções industriais anteriores que as caracterizam como tal e não apenas como mudanças evolutivas. Nesse ínterim, o estágio que pré-condiciona a revolução é caracterizado pelo acúmulo de novas tecnologias de produção em volume suficiente para gerar alterações no desenvolvimento econômico a partir de sua produção. O momento seguinte marca o início do processo revolucionário, quando há a incorporação efetiva dessas tecnologias à cadeia produtiva, fato que promove transformações sistêmicas na estrutura industrial. Estas criam uma demanda cada vez maior por nova infraestrutura, a ser atendida especialmente pelo Estado, e estabelecem novos pontos de referência para o desenvolvimento econômico a serem assimilados por todos os agentes: necessidade de domínio sobre as novas tecnologias e suas aplicações e novas qualificações exigidas no mercado de trabalho são alguns exemplos. Toda a sociedade passa então a se reestruturar em função do novo modelo de produção (POPKOVA; RAGULINA; BOGOVIZ, 2018).

Conforme os processos descritos ganham maior maturidade em função do tempo, efeitos de sinergia começam a ser verificados. O primeiro deles está relacionado à redução do consumo de energia e de insumos por unidade produzida, o que promove um aumento do volume de produção industrial e conseqüente redução de custos a partir do alcance de economias de escala. Ademais, são observadas também melhoras no processo logístico a partir do emprego das novas tecnologias ao longo de toda a cadeia de fornecimento, que passam a se adequar cada vez mais às características intrínsecas dos produtos e aos novos padrões de consumo. O aprofundamento da complexidade dos produtos é outro aspecto a ser destacado, resultante do gradativo aperfeiçoamento técnico na linha de produção, da utilização de novos materiais e de alterações ergonômicas (POPKOVA; RAGULINA; BOGOVIZ, 2018).

Todos os parâmetros utilizados pelo modelo para definir as revoluções prévias são refletidos no conceito de Indústria 4.0. As inovações iniciais acumuladas que preconizam o processo revolucionário se dão em termos das tecnologias-base discutidas anteriormente na seção 2.2, estando a finalidade e, portanto, o caráter das transformações sistêmicas promovidas, ligada à consolidação de uma cadeia produtiva totalmente automatizada. Os requisitos de infraestrutura, por sua vez, são relacionados principalmente à provisão de internet de alta velocidade, implicando investimentos em estruturas de cabos de fibra ótica,

servidores e segurança digital, além de uma diversificação da matriz energética rumo à ampliação da participação de fontes renováveis para garantir a estabilidade das conexões (POPKOVA; RAGULINA; BOGOVIZ, 2018; SCHWAB, 2016).

Contudo, mesmo atendendo aos requisitos constatados nas três primeiras revoluções industriais, o potencial disruptivo denotado pela Quarta Revolução Industrial parece ir bastante além daquele verificado em seus congêneres. O principal indício dessa constatação se deve ao fato de que o estabelecimento da Indústria 4.0 implica, em última instância, a exclusão do trabalho humano do processo produtivo. Outro aspecto que aprofunda ainda mais o caráter revolucionário da Indústria 4.0 é a amplitude das transformações sistêmicas promovidas, que passam a abranger outras áreas de empresas industriais que não só a produção: logística, gerenciamento, marketing, vendas, entre outros (POPKOVA; RAGULINA; BOGOVIZ, 2018). A disseminação da IA entre os diferentes setores das companhias torna o processo de difusão de informações mais eficiente, acarretando um processo de tomada de decisão mais preciso e rápido. Ordens de compra mais complexas passam a ser imediatamente processadas, inseridas em uma linha de produção altamente flexível. Esta, por meio da manufatura aditiva, é capaz de projetar e assimilar produtos com finalidades similares, mas com atributos totalmente diferentes, definidos com base na demanda do cliente (AHUETT-GARZA; KURFESS, 2018).

Ademais, a Indústria 4.0 tem o potencial para reduzir externalidades negativas do processo de globalização⁶ sem afetar, contudo, a conectividade entre os agentes. A eliminação do componente humano da linha de produção expurga consigo a sujeição de grupos de pessoas a condições precárias de trabalho. Adicionalmente, a completa automatização da indústria, conjugada com o controle e o gerenciamento remotos, possibilita a instalação das plantas fabris em áreas isoladas, reduzindo o impacto direto da atividade industrial sobre a saúde da população (POPKOVA; RAGULINA; BOGOVIZ, 2018).

Outra diferença observada diz respeito aos padrões de proteção da propriedade intelectual. A possibilidade de resguardar informações importantes de concorrentes e potenciais competidores a respeito do processo de fabricação dos produtos verificada até então será posta em xeque uma vez estabelecido o padrão de integração informacional esperado. Sendo assim, os mecanismos de salvaguarda dos ativos intelectuais estarão restritos

⁶ O processo de globalização aqui referido diz respeito ao aprofundamento da interconexão e interdependência entre os países verificado a partir da disseminação das TICs da Terceira Revolução Industrial, nos anos 1970. Esse processo refletiu não só um avanço na velocidade com que as informações passaram a ser disseminadas, como também motivou a transferência das plantas fabris dos centros econômicos para países subdesenvolvidos em busca da redução dos custos operacionais (CARVALHO; CAZARINI, 2020; POPKOVA; RAGULINA; BOGOVIZ, 2018).

ao âmbito jurídico e passíveis de ativação em caso de utilização indevida das informações, que serão de posse de todos os agentes (POPKOVA; RAGULINA; BOGOVIZ, 2018). Em torno deste assunto específico o novo paradigma industrial apresenta uma característica inusitada: a principal fonte de geração pelo aumento da produtividade na nova era industrial, qual seja, a propriedade intelectual, será acessível como nunca antes.

Destaca-se ainda o elevado grau de resposta apresentado pela Indústria 4.0 à mudança no direcionamento da produção. A alta flexibilidade que distingue a planta do novo paradigma industrial permite às empresas uma atuação em mais de um setor de acordo com a demanda, passando a produzir equipamentos e/ou produtos com aplicações totalmente diferentes voltadas a um público distinto (POPKOVA; RAGULINA; BOGOVIZ, 2018). Nesse ponto, a velocidade de incorporação das novas tecnologias por parte das companhias rumo ao estabelecimento de plantas fabris flexíveis será definidora de uma possibilidade de auferimento de ganhos oportunistas a partir de situações específicas de mercado ou então do encolhimento de suas margens provocado pelo aumento no número de concorrentes. Novamente, a consolidação de um arranjo regulatório será imprescindível para tratar do tema (POPKOVA; RAGULINA; BOGOVIZ, 2018).

2.4 IMPACTOS DA INDÚSTRIA 4.0 SOBRE O TRABALHO

Dados o relativo acúmulo das tecnologias do novo paradigma industrial, principalmente em economias desenvolvidas, e o início do processo de incorporação destas à cadeia de produção, os impactos advindos do processo revolucionário já começam a tomar forma. Nesse estágio incipiente, serão ainda verificados de forma sutil, sendo necessária para sua identificação a análise do comportamento dos fatores de produção não-estáticos: capital e trabalho. Tendo sido o primeiro já extensivamente trabalhado ao longo da apresentação das novas tecnologias e de suas características na nova disposição da indústria, cabe agora a avaliação das tendências de mudança sobre os atributos do segundo fator mencionado.

Historicamente, a prevalência do trabalho humano sobre o capital se dá em função de sua capacidade de adquirir e aplicar novas habilidades através da educação (FREY; OSBORNE, 2013). Contudo, conforme a capacidade de tomada de decisão das máquinas avança cada vez mais por meio da IA para domínios cognitivos, a manutenção dessa relação será cada vez mais estressada. Computadores conseguem ser tão ou mais produtivos que os humanos quando o problema é passível de especificação, ou seja, quando os critérios de sucesso da tarefa são quantificáveis e podem ser facilmente avaliados (SCHUH et al., 2020).

A extensão da informatização do trabalho é limitada, portanto, pelo avanço de tecnologias que permitam a especificação de problemas cada vez mais complexos (BRYNJOLFSSON; MCAFEE, 2011). Ao longo das demais revoluções industriais, a informatização esteve confinada a atividades manuais e/ou cognitivas de rotina, envolvendo atividades explicitamente baseadas em regras. Os avanços promovidos pela Indústria 4.0, contudo, têm permitido à máquina o alcance de domínios comumente classificados como não-rotineiros (FREY; OSBORNE, 2013; SCHWAB, 2016).

Avanços tecnológicos recentes têm sido observados na busca pela transformação de tarefas que não apresentam características de rotina estruturada em problemas bem definidos. Esse processo se dá especialmente a partir da obtenção, armazenamento e processamento de uma grande quantidade de dados relevantes, fazendo com que atividades relativamente complexas como dirigir e escrever se tornem passíveis de informatização (CHUN; KIM; LEE, 2018). Em outras palavras, o suporte de dados fornecido pela tecnologia de *Big Data* tem sido crucial nesse processo, uma vez que amplifica o limite de uma das principais vantagens comparativas dos computadores em relação ao trabalho humano: a escalabilidade. Outra vantagem das máquinas é a ausência de certos atributos inerentes ao ser humano, como a necessidade de dormir, a interferência de sentimentos sobre a capacidade cognitiva, a existência de preocupações outras que não a ocupação produtiva, entre outros (FREY; OSBORNE, 2013).

A partir dessa perspectiva, a conclusão que se tem é de que é possível automatizar praticamente qualquer tarefa. Desde que uma quantidade suficiente de dados seja coletada para que se possa identificar os padrões envolvidos, sejam eles relativos a ações a serem realizadas ou a reações à dinâmica do ambiente, máquinas passam a ser capazes de executar tarefas assim como humanos. A velocidade com que esses gargalos informacionais são superados determinará a extensão da informatização no Século XXI (SCHWAB, 2016; BRYNJOLFSSON; MCAFEE, 2011).

Existem, no entanto, diferenças no que diz respeito à suscetibilidade das tarefas à informatização. Tarefas repetitivas e processuais, consideradas tarefas de rotina, são altamente passíveis de automação e já estão passando por esse processo desde a Revolução Industrial anterior. Tarefas cuja consecução das ações a serem tomadas não se coloca de forma clara – tarefas não-rotineiras – representam a barreira para o avanço da aplicabilidade das máquinas em comparação às capacidades humanas. Nesse sentido, Frey e Osborne (2013) elencam três diferentes grupos de tarefas não-rotineiras de acordo com suas requisições cognitivas e/ou manuais. O primeiro se refere a tarefas de percepção e manipulação, que envolve a aplicação

conjunta de todo ou grande parte do sistema sensorial humano. Relacionam-se com a manipulação e identificação precisa de objetos, por vezes irregulares, em campos de visão desordenados ou então à execução de rotinas em ambientes não-padronizados. Exemplos de locais de trabalho adequados a rotinas regulares ao longo do tempo são aeroportos, estoques de supermercados, fábricas e hospitais, enquanto casas seriam classificadas como irregulares (FREY; OSBORNE, 2013).

Outro rol de tarefas está relacionado à inteligência criativa. Estas envolvem o estabelecimento de combinações não-usuais de ideias familiares para que sejam criadas ideias ou objetos originais e de valor, o que pressupõe uma vasta gama de conhecimento acumulado por quem as realiza (FREY; OSBORNE, 2013). Nesse ínterim, o desafio humano é encontrar meios confiáveis para chegar a combinações que façam sentido. Quanto à máquina, criar inovações no âmbito de ideias não é tão desafiador; o obstáculo a ser superado é relacionado à descrição dos valores de criatividade humana de forma suficientemente clara para que possam ser interpretados e incorporados a um *software*. Outro desafio é colocado no sentido de que os valores humanos se alteram com o tempo e variam entre culturas, fazendo com que a definição de um padrão estático seja difícil de se estabelecer (FREY; OSBORNE, 2013).

Aponta-se também para um conjunto de tarefas de inteligência social, cujas habilidades fundamentais incluem capacidades de compreensão e atuação subjetiva em um contexto de interação entre duas ou mais pessoas. Exemplos de tarefas que se enquadram neste grupo dizem respeito a situações que demandem convencimento, persuasão, negociação, cuidado e empatia. Destarte, a assimilação do senso comum, o reconhecimento da emoção humana em tempo real e o desenvolvimento da habilidade de responder de acordo com as reações do interlocutor ainda é um desafio bastante grande para os computadores (FREY; OSBORNE, 2013).

Em resumo, Frey e Osborne (2016) concluem que posições que exigem alta competência e contam com altos salários correm menor risco de serem substituídas por capital informacional. É evidenciada a existência de uma relação inversamente proporcional entre os níveis de salário e educação e a suscetibilidade à automação dos postos de trabalho, sendo “ocupações generalistas que requeiram conhecimento da heurística humana e ocupações especializadas envolvendo o desenvolvimento de ideias e artefatos inovadores” (FREY; OSBORNE, 2013, p. 266, tradução nossa) as mais distantes do processo de informatização. Aqui, pode-se elencar o alto escalão executivo de empresas e equipes de cientistas ligados à P&D. A tendência que se vislumbra para a demanda do mercado sobre as competências dos profissionais favorecerá habilidades de resolução de problemas complexos, competências

sociais e de domínio de sistemas em detrimento de habilidades físicas ou competências técnicas específicas (SCHWAB, 2016).

Esse movimento gera impactos relevantes também para os demais segmentos do mercado de trabalho. Ainda segundo Frey e Osborne (2016), 47% do total de ocupações nos EUA já estaria na categoria de risco de informatização, concentrando-se especialmente sobre aquelas de baixa complexidade. Se colocado esse efeito em perspectiva à tendência de configuração da distribuição da mão de obra no país mencionado, a ideia de esvaziamento da pirâmide de trabalho passa a ser também um risco a ser considerado a partir do advento da Indústria 4.0: a Revolução Industrial anterior conformou uma distribuição em *U* dos empregos entre a população, automatizando em maior medida atividades de média complexidade, processo que será, a princípio, complementado por um achatamento da extremidade esquerda (FREY; OSBORNE, 2013). Nesse contexto, postos em setores como transportes e logística, junto à massa de trabalhadores em cargos de suporte administrativo, de escritório e nas plantas fabris denotam grandes chances de substituição por máquinas. Estas incluem carros autônomos, recursos de *Big Data* em escritórios para armazenamento e acesso a informações e robôs para a assimilação de partes em linhas de produção. Ocupações do terceiro setor também são vistas como bastante suscetíveis à automação, especialmente servidores domésticos, agentes de telemarketing, caixas e balconistas (FREY; OSBORNE, 2013; SCHUH et al., 2020).

Dois são os impactos do desenvolvimento tecnológico sobre o emprego. Este descrito em maior profundidade até aqui se refere ao efeito disruptivo, que acarreta a necessidade de reposicionamento da força de trabalho no mercado (FREY; OSBORNE, 2013; SCHWAB, 2016). Suas consequências são mais facilmente projetadas devido ao alto grau de domínio da ciência sobre as aplicabilidades imaginadas para as novas tecnologias e a conjunta realização de exercícios preditivos de sua implementação em larga escala dado o contexto – estático – industrial atual. Existe ainda um efeito contrário, de capitalização, em que novas ocupações são criadas com base na nova configuração da estrutura produtiva (FREY; OSBORNE, 2013; SCHWAB, 2016). A capacidade humana de predição do grau de extensão desse efeito é, entretanto, menor devido a sua forte relação com o componente dinâmico da economia, dificilmente simulado com precisão. Mesmo assim, a Nova Revolução Industrial parece estar dando indícios de que a humanidade enfrentará um processo de sobreposição da descoberta de novas formas de poupar trabalho frente à velocidade com a qual somos capazes de encontrar novas aplicações para ele (FREY; OSBORNE, 2013).

2.5 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

Frente ao problema central do trabalho, este capítulo definiu a Indústria 4.0 em termos de seus princípios estruturantes, tecnologias fundamentais e tecnologias de interface, elencando também seus principais efeitos sobre o ambiente econômico com relação à organização dos agentes e sobre outro fator de produção, qual seja, o trabalho. A partir da delimitação clara do objeto de estudo por meio desse exercício, dá-se o passo inicial rumo ao atingimento do objetivo geral do trabalho, que busca identificar, com base na experiência internacional, as prioridades de atuação que tornem uma eventual nova política industrial brasileira potencialmente apta a endogeneizar a dinâmica da Quarta Revolução Industrial. O primeiro objetivo específico, discutir as características da Quarta Revolução Industrial, é alcançado a partir das análises e discussões apresentadas neste capítulo.

3 A QUARTA REVOLUÇÃO INDUSTRIAL: UM PANORAMA INTERNACIONAL

Uma vez definidos os conceitos e aspectos que permeiam a Revolução Industrial em curso, cabe agora discutir acerca do modelo a ser utilizado para avaliar o nível de competitividade dos países selecionados. Optou-se pela utilização do modelo do Diamante Competitivo, estabelecido por Michael Porter em 1990, em razão de dois motivos principais: i) ele sistematiza a competitividade em função do ambiente nacional; e ii) possui um caráter amplo, flexível e suficiente para qualificar a competitividade de um país em termos da constituição de um novo paradigma industrial sem que haja perda de capacidade analítica. Em não havendo consenso em torno de um modelo definitivo para a avaliação da competitividade – seja ela relativa a países, indústrias ou empresas – (VLADOS, 2019), a estrutura do Diamante Competitivo se mostra apta a incorporar à análise os aspectos incipientes da Indústria 4.0 que, mesmo não inseridos em uma cadeia de valor caracterizada como tal, desde já parecem afetar a competitividade nacional. A escolha dos países para a realização dos estudos de caso, Alemanha e China, justifica-se pela sua relevância no cenário mundial no que tange à Indústria 4.0, descritas em maior detalhe ao longo das respectivas seções de estudo de caso.

Dessa forma, cabe à seção 3.1 discutir as abordagens teóricas sobre a competitividade dos países para, a partir disso, analisar com maior grau de aprofundamento o modelo do Diamante Competitivo de Porter. A seção 3.2, por sua vez, define a adaptação feita com vistas à aplicação do modelo do Diamante Competitivo para analisar a Indústria 4.0, elencando os fatores considerados e os indicadores parciais estabelecidos para cada fator. Além disso, apresenta os estudos de caso de Alemanha e China através das subseções 3.2.1 e 3.2.2, respectivamente. A seção 3.3, por fim, apresenta considerações preliminares a respeito do atingimento dos objetivos do presente trabalho a partir deste capítulo.

3.1 A COMPETITIVIDADE INTERNACIONAL E O DIAMANTE DE PORTER

A competitividade, em relação ao grau de dinamismo do ambiente econômico, não é atribuída como característica intrínseca do Estado de forma consensual na literatura. As teorias econômicas clássica e neoclássica, por exemplo, avaliam a interação entre Estados no contexto internacional sob a ótica das trocas, cujas características são resultado da distribuição da produção entre os países de acordo com a existência de fatores e capacidades internos que beneficiem mais ou menos a instalação de determinados ramos industriais (SMIT, 2010).

Dessa forma, não existe sentido em se mensurar a competitividade de um país justamente porque a competição entre países é inexistente: dada a livre circulação dos fatores de produção no mercado (pressuposto destas teorias), a concorrência se dá exclusivamente em âmbito microeconômico entre as empresas e indústrias, que buscam ampliar as vantagens relativas que possuem por meio do constante aprofundamento de sua especialização (FANG et al., 2018). Podem ser apontadas como principais vertentes dessa abordagem a Teoria das Vantagens Absolutas, a Teoria das Vantagens Comparativas e, mais recentemente, a Nova Teoria do Comércio Internacional (SMIT, 2010).

Porter (1990a), contudo, sustenta que a especialização das economias em determinados setores da indústria não se dá exclusivamente a partir de vantagens intrínsecas a elas. Sem negar o papel relevante que estas possuem na distribuição mundial da produção, o autor acrescenta as iniciativas conduzidas por entidades privadas e/ou públicas como elementos determinantes do desenvolvimento industrial. Tais iniciativas são capazes de alterar o contexto econômico vigente com vistas à promoção de um setor específico, podendo ter êxito caso conduzam modificações em condições estruturais (recursos produtivos, estruturas organizacionais, infraestrutura, estrutura concorrencial) e não reduzam a exposição dos agentes à concorrência interna ou internacional (FANG et al., 2018). Dessa forma, a competitividade passa a figurar como elemento de caracterização do Estado, um dos fatores determinantes do sucesso das companhias nele localizadas em termos de sua projeção internacional e mesmo dos padrões de fluxo externo de investimentos (PORTER, 1990b).

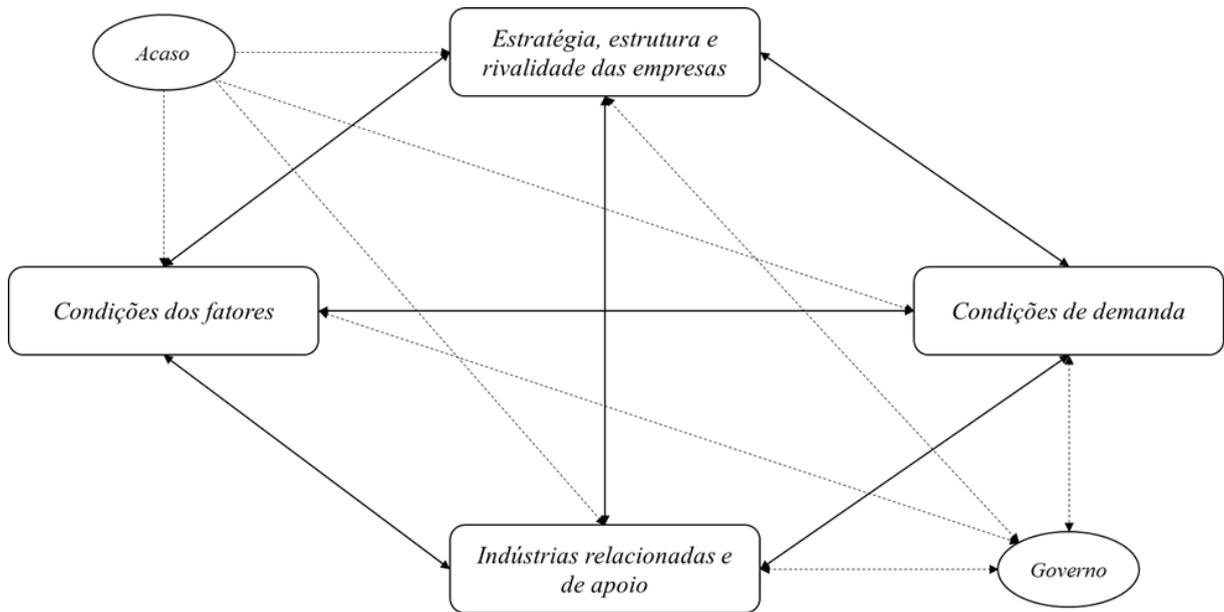
Para fins de comparação, vale destacar que a finalidade dos arranjos teóricos apresentados não é exatamente a mesma. O primeiro busca, através da aplicação de modelos estatísticos baseados em pressupostos estáticos, explicar como e porque ocorrem as relações comerciais entre países (SMIT, 2010). Dessa forma, são destacados os benefícios advindos dessas trocas (ampliação de mercado, ganhos de escala, entre outros) e a constituição de um jogo de soma positiva que caracteriza a dinâmica: a alocação ótima dos recursos produtivos de um país viabiliza o fortalecimento de alguns setores, que passam a atender à demanda de outros países através do comércio, podendo estes direcionar seus recursos próprios para as atividades que realizem de forma mais eficiente; como resultado, tem-se a elevação da produtividade global agregada da economia (SMIT, 2010). O segundo, em contrapartida, estabelece um modelo para definir e avaliar as vantagens competitivas específicas de um país. Tais vantagens estão relacionadas a ganhos orgânicos aos quais as empresas inseridas no contexto socioeconômico de determinado país estariam expostas e se referem ao aumento da

produtividade dos agentes, em especial, e à capacidade de antecipação de tendências de mercado por parte das empresas (SMIT, 2010; PORTER, 1990b).

A tendência de especialização das economias dos países em torno de setores industriais específicos pode ser encarada como um ponto de aproximação entre as duas vertentes. Na visão de Porter (1990a), contudo, este processo está fortemente relacionado à localização geográfica e pode ser conduzido de forma intencional pelos agentes econômicos, inclusive o governo. A elevação da produtividade mundial agregada é também tida como produto da interação competitiva entre os países, embora não ocorra de forma linear devido à ocorrência – não exclusiva – de jogos de soma zero ao longo dessa dinâmica (SMIT, 2010). Não há, portanto, a formalização de uma teoria que explique o modo como se dá a competição entre países, mas sim o estabelecimento de um modelo para explicar por que determinadas indústrias em determinados países apresentam rendimentos mais elevados e, conseqüentemente, maior grau de desenvolvimento (SMIT, 2010; PORTER, 1990b).

Para tanto, o instrumental proposto por Porter (1990a) elenca seis variáveis, sendo quatro principais e duas complementares, que seriam responsáveis por determinar as condições subjacentes da competitividade nacional. São elas as *condições dos fatores*, as *condições de demanda*, as *indústrias relacionadas e de apoio* e a *estratégia, estrutura e rivalidade das empresas*, além do papel desempenhado pelo *governo* e da suscetibilidade dos acontecimentos ao *acaso*. Através de uma perspectiva que considera os efeitos simultâneos das diferentes variáveis entre si e sobre os agentes econômicos (PORTER, 1990b), constitui-se o modelo do *Diamante Competitivo*, conforme esquematizado no Diagrama 1, abaixo:

Diagrama 1: O modelo sistêmico do Diamante Competitivo de Porter.



Elaborado pelo autor com base em Porter (1990a, p. 171).

As *condições dos fatores* dizem respeito à disponibilidade e ao grau de especialização dos fatores de produção verificados nos países. Para além dos fatores elencados pela teoria econômica tradicional – terra, capital e trabalho –, Porter (1990a) distingue entre recursos humanos, recursos físicos, recursos de conhecimento, recursos de capital e infraestrutura como sendo categorias mais adequadas para se referir ao conjunto de componentes fundamentais do processo produtivo. Ademais, o autor estabelece uma distinção entre fatores básicos – como recursos naturais, condições climáticas, localização, trabalho (semi-) qualificado, mercado de dívida privada – e fatores avançados – como infraestrutura digital de tecnologias da informação, mão de obra altamente qualificada, institutos de pesquisa avançada e mercado de financiamento de capital de risco bem estruturado. O primeiro grupo de fatores é passivamente adquirido ou requer poucos investimentos para ser construído, sendo estes incapazes de sustentar vantagens competitivas aos países no longo prazo e, dessa forma, perdendo importância nesse processo conforme é verificado o avanço do desenvolvimento industrial (PORTER, 1990a).

O segundo grupo, por sua vez, é mais escasso em função de sua alta complexidade e extrema especialização, voltada ao atendimento das necessidades de setores específicos aos quais são capazes de sustentar vantagens competitivas importantes (PORTER, 1990a). São, portanto, mais dificilmente replicados devido ao requerimento de um fluxo constante de investimentos para que sejam criados (PORTER, 1990b). No que diz respeito, portanto, às

condições dos fatores, o sucesso dos países em termos do desempenho de setores industriais depende principalmente de sua capacidade de inovação aplicada aos fatores de produção (VLADOS, 2019). Dessa forma, ao contrário do que sustenta a teoria neoclássica, “o estoque de fatores em um determinado ponto no tempo é menos importante do que a taxa em que eles são criados, aperfeiçoados e tornados mais específicos para determinadas indústrias” (PORTER, 1990a, p. 114, tradução nossa), sendo o acesso facilitado a fatores de produção uma condição que estimula a utilização ineficiente dos recursos por parte das empresas.

As dificuldades impostas pela escassez de certos fatores de produção, a exemplo de falta de matérias-primas, trabalho ou altos custos de arrendamento, têm o potencial para, inclusive, impulsionar as vantagens competitivas das nações (VLADOS, 2019). Tal processo é qualificado como desvantagem seletiva e se dá exclusivamente sob três condições: i) as desvantagens devem incentivar a adoção de práticas capazes de trazer benefícios à empresa mesmo em condições desfavoráveis, fazendo com que haja uma antecipação de tendências do setor em nível mundial; ii) devem existir condições favoráveis em outros vértices do diamante, ou seja, pressões que estimulem o processo de inovação das empresas a partir de características da demanda ou da concorrência; e iii) o comprometimento das empresas nacionais com seu setor industrial de origem, fazendo com que a estrutura concorrencial seja preservada e evitando a evasão para outras atividades em que a condução das operações sejam relativamente menos complexas (PORTER, 1990a).

Adiante, as *condições de demanda* são também elencadas por Porter (1990a) como um fator capaz de criar vantagens competitivas. De forma análoga à dinâmica verificada para os fatores de produção, a contribuição da demanda para a competitividade industrial dos países se dá a partir de pressões impostas sobre as empresas capazes de estimular a inovação. Embora admita as vantagens estáticas obtidas a partir de condições favoráveis de demanda em termos de economias de escala, conforme postulado pela teoria econômica clássica, Porter (1990a) vê em seu aspecto dinâmico o maior potencial de constituição de vantagens à indústria. Seus efeitos são verificados especialmente em termos da demanda interna, a qual o autor identifica como possuindo “um efeito desproporcional sobre como as companhias percebem, interpretam e respondem às necessidades dos consumidores” (PORTER, 1990b, p. 82, tradução nossa). Nesse ínterim, a composição da demanda interna é vista como atributo principal na geração de vantagens competitivas para a variável em questão, sendo caracterizada pela estrutura de segmentação da demanda, pela sofisticação e exigência dos consumidores e pelas necessidades antecipatórias dos consumidores (PORTER, 1990a).

Nações tendem a consolidar vantagens competitivas em segmentos industriais que apresentem alta participação na demanda interna relativamente aos demais. Mesmo que possua um tamanho absoluto menor em comparação ao mesmo segmento em outros países, a alta necessidade da economia do país verificada sobre os produtos da atividade promove a concentração dos investimentos internos sobre ela e eleva sua dinamicidade em termos de criação e implementação de inovações tecnológicas (VLADOS, 2019). A existência de consumidores sofisticados, com exigências mais elaboradas em relação a consumidores de outros países, é outra fonte de vantagens competitivas das nações. Essa característica é definida por Porter (1990a) como o maior determinante do componente dinâmico da demanda, a partir do qual as empresas se deparam com a necessidade constante de melhoria de seus processos internos e da qualidade de seus produtos. Consequentemente, acabam por atingir padrões de excelência e eficiência dificilmente alcançados por seus pares em outros países, uma vez que são originados com base em condições e valores locais (PORTER, 1990b). Outrossim, padrões de consumo passivamente capazes de antecipar tendências mundiais de consumo constituem outra característica da composição da demanda interna bastante relacionada à demanda sofisticada dos consumidores, sendo ambas constatadas, frequentemente, de forma simultânea (VLADOS, 2019).

O auferimento de benefícios a partir da antecipação das tendências mundiais de consumo, contudo, é condicionado também pelos mecanismos de transmissão das preferências domésticas a mercados estrangeiros (PORTER, 1990a). Em outras palavras, relaciona-se à capacidade de replicação das condições internas de um país – sob as quais as empresas nacionais possuem maior vantagem – para além de suas fronteiras, fazendo com que mesmo eventuais ineficiências constituídas a partir de condições locais possam ser incorporadas ao padrão de consumo internacional. Assim, passam a ser gradativamente mitigadas sem prejuízo ao país em questão. É importante salientar, contudo, a preponderância dos componentes da demanda interna sobre o atributo em questão: a criação de mecanismos de transmissão de preferências domésticas não se sustenta caso estas se mostrem demasiadamente rígidas em termos das condições que as viabilizam (VLADOS, 2019). Tais mecanismos envolvem a internacionalização de empresas nacionais, o acúmulo de conhecimento técnico específico capaz de consolidar polos de treinamento e capacitação internacionalmente reconhecidos, a exportação de bens culturais, a migração populacional, os laços históricos entre países e as alianças políticas (PORTER, 1990a).

O último atributo relacionado à sustentação de vantagens competitivas por meio das *condições de demanda* considera seu tamanho e padrão de crescimento. Aqui são verificados

especialmente os potenciais ganhos de escala – estáticos – advindos da proporção da demanda agregada sobre a produção. Tal aspecto contribui também para a amplificação dos efeitos advindos da composição da demanda interna, podendo mesmo a sua saturação ser benéfica quando estimula a busca por aumento da participação das empresas nacionais em mercados de outros países (PORTER, 1990b).

As indústrias relacionadas e de apoio constituem outra das variáveis elencadas no modelo do *Diamante Competitivo*. A existência de indústrias fornecedoras internacionalmente competitivas nos países garante, naturalmente, vantagens em termos de acesso rápido, eficiente e, por vezes, preferencial a matérias-primas. Ademais, a proximidade a fornecedores sofisticados em termos de produtos e processos facilita a consolidação da cadeia de valor industrial entre ofertantes e demandantes, gerando efeitos sinérgicos e reduzindo ao máximo o atrito ao longo do sistema de fornecimento (PORTER, 1990b). O surgimento de inovações e aprimoramentos passa a ser mais recorrente: a proximidade entre indústria e fornecedores altamente qualificados eleva o fluxo de informações e ideias destes para aquela, fazendo com que novos métodos sejam aplicados e até mesmo desenvolvidos de forma conjunta em projetos de P&D (VLADOS, 2019). O mesmo efeito é verificado para indústrias correlatas ou de apoio, em que há a possibilidade de coordenação ou compartilhamento de atividades ao longo da cadeia de valor em um ambiente concorrencial ou nas quais se identifica complementaridade entre as atividades (PORTER, 1990a). Destarte, a consolidação de ambientes mais competitivos ou mesmo a constituição de uma demanda mais sofisticada elevam o padrão industrial ou estimulam o desenvolvimento de novos setores.

A última das quatro variáveis principais do modelo do *Diamante Competitivo* diz respeito à *estratégia, estrutura e rivalidade das empresas*. Esta se refere ao “contexto em que as empresas são criadas, organizadas e geridas, bem como à natureza da concorrência doméstica” (PORTER, 1990a, p. 149, tradução nossa). A forma como são constituídas vantagens competitivas a partir de tal fonte é, contudo, relacionada a seu caráter complementar às demais variáveis e, conseqüentemente, às vantagens competitivas já existentes. Aspectos culturais são responsáveis pela determinação dos valores e da forma como se dá a relação entre as pessoas, atributos cuja interação culmina em diferentes modelos de condução das atividades empresariais: maior ou menor aversão a riscos, condução de negociações, perfil técnico dos executivos, autonomia dos funcionários, dentre outros atributos definidos com base em diferentes modelos de gestão, serão mais adequados a um ou outro setor (PORTER, 1990a). A partir dessa dinâmica também são constituídos os diferentes objetivos de empresas e indivíduos em uma nação. É estabelecida uma forte relação entre os

objetivos das companhias e as características do mercado de capitais nacional, em que estas são refletidas na forma e velocidade com que as entidades empresariais buscam alcançar suas metas (PORTER, 1990b). A motivação dos indivíduos acaba sendo, portanto, outro fator determinante para o estabelecimento das vantagens competitivas da nação. As trajetórias acadêmicas e profissionais escolhidas pelos indivíduos, bem como seu nível de comprometimento e esforço, influenciam diretamente o sucesso nacional (PORTER, 1990b).

O ambiente concorrencial interno é o componente final do vértice analisado e, também, o mais importante na definição de vantagens competitivas. Isso ocorre devido ao alto grau de influência que possui sobre as demais variáveis do diamante, fazendo com que o emprego dos recursos físicos e intelectuais seja feito de forma cada vez mais eficiente (VLADOS, 2019). De forma semelhante ao exposto anteriormente nesta seção, o aprofundamento dos efeitos da concorrência trazido pela proximidade entre os agentes torna a interação doméstica mais relevante em relação à externa, uma vez que as movimentações de mercado são percebidas com maior rapidez e precisão na identificação das causas e efeitos gerados (PORTER, 1990b). Sendo assim, soluções pioneiras tendem a ser incorporadas em estratégias de *catch up* por concorrentes com mais facilidade e com maior grau de sucesso tendo em vista o compartilhamento de condições econômicas similares.

Outrossim, um ambiente competitivo promove a melhoria dos fatores e das condições de produção a partir da disputa não só por uma maior parcela do mercado como também por recursos humanos e por investimentos governamentais, que tendem a ser mais amplos quanto mais descentralizada for a demanda por infraestrutura (PORTER, 1990b). Outra consequência relativa à aplicação dos recursos do governo é que uma concorrência dinâmica reduz as chances de que esse processo sustente ineficiências produtivas por meio da seleção de campeões nacionais (VLADOS, 2019). A presença de competidores domésticos estimula a busca pelo estabelecimento de vantagens competitivas, uma vez que vantagens estáticas – custo dos fatores de produção, acesso preferencial ao mercado consumidor, disponibilidade de infraestrutura – acabam por esgotar-se rapidamente, tornando-se insuficientes para a sustentação das empresas. Por fim, a relativa saturação do mercado interno e os benefícios advindos da pressão inovadora sobre as empresas para lidar com tais restrições impulsionam-nas a ampliar sua presença a nível internacional (PORTER, 1990b).

Outras duas variáveis influentes na determinação de vantagens competitivas são o *acaso* e o *governo*. Estas são destacadas pelo efeito indireto que possuem – ou que deveriam se restringir a possuir, no caso do segundo item – sobre os demais fatores, com grande potencial de amplificação das vantagens neles constatadas ou mesmo de criação de condições

favoráveis para que novas vantagens competitivas sejam criadas (PORTER, 1990a). O primeiro item, resumidamente, incorpora um componente aleatório à estrutura do modelo, sobre o qual os agentes possuem pouco ou nenhum controle. É destacado o efeito disruptivo trazido por acontecimentos dessa natureza, em que choques advindos de descontinuidades na cadeia de suprimentos internacional, crises financeiras, guerras, entre outros, beneficiam alguns países em detrimento de outros devido às diferentes configurações verificadas em seus diamantes (VLADOS, 2019).

O papel do *governo*, por outro lado, envolve um maior grau de previsibilidade quanto aos impactos gerados, o que, contudo, não exige a complexidade na implementação de medidas benéficas à competitividade industrial. A consolidação de uma nova vantagem competitiva é um processo que pode levar mais de uma década de investimentos constantes, abrangendo o aumento da qualificação humana, o aprimoramento de produtos e processos, a criação de novos conglomerados industriais ou a penetração em mercados estrangeiros (PORTER, 1990b). Os retornos esperados a partir de ações políticas, contudo, apresentam uma tendência mais imediatista tanto da perspectiva da população quanto da perspectiva dos governantes, especialmente ao se considerar regimes democráticos (SCHUMPETER, 2003). Isso cria, conseqüentemente, estímulos para que se desenhem políticas de caráter imediatista, com foco no auferimento de benefícios de curto prazo e que explorem vantagens estáticas do ambiente industrial do país (SMIT, 2010). Estas mesmas políticas, no entanto, possuem efeitos nocivos à competitividade nacional no longo prazo, por sustentarem condições inorgânicas de mercado cada vez mais dependentes de estímulos artificiais, além de reduzirem o estímulo à inovação: concessão de subsídios, regulações de mercado protecionistas e concentração de mercado a partir de fusões são alguns exemplos que podem ser trazidos a esse respeito (PORTER, 1990b).

Para Porter (1990a), a principal atribuição do *governo* é a atuação enquanto catalisador da criação de vantagens competitivas em setores industriais por parte dos próprios agentes que a compõem. Destarte, sua prioridade deve ser o estabelecimento de condições que viabilizem ao máximo esse processo. A esse respeito, destaca-se a criação de fatores elementares, como a constituição de sistemas de educação básica e de saúde, de plataformas logísticas e de fontes de energia, e especializados, como a estruturação de centros avançados de pesquisa, de sistemas de aprendizagem profissional e a viabilização de investimentos privados a partir de financiamentos (VLADOS, 2019). Por fim, o compromisso com a manutenção da concorrência interna também é tido como importante atribuição do Estado no processo de criação de vantagens competitivas, materializando-se através da desregulação da competição,

da desaprovação de fusões entre líderes de mercado e do estabelecimento de padrões regulatórios rígidos de qualidade, segurança e impacto ambiental (PORTER, 1990b).

3.2 UMA AVALIAÇÃO DA INDÚSTRIA 4.0 A PARTIR DA ÓTICA DA COMPETITIVIDADE: OS CASOS DE ALEMANHA E CHINA

Para os fins do presente estudo, os atributos utilizados para sustentar a avaliação da competitividade nos casos considerados são as *condições dos fatores*, as *indústrias relacionadas e de apoio*, a *estratégia, estrutura e rivalidade das empresas* e o *governo*. O primeiro é avaliado em termos do grau de especialização da mão de obra, das condições dos centros de P&D, das condições de infraestrutura e das condições de financiamento, todos voltados exclusivamente à implementação do novo paradigma industrial. O segundo é definido a partir da análise das indústrias nacionais de semicondutores e de *software*. O terceiro, a partir da análise da disseminação das novas tecnologias sobre as PMEs do país. O quarto, por fim, é abordado de forma indireta a partir da exposição de iniciativas provenientes desta esfera ao longo da análise das outras três variáveis, quando pertinente. Cabe salientar que, neste ponto, a estrutura aqui proposta diverge da sistematização original de Porter: considera-se o *governo* um atributo igualmente central para a avaliação da competitividade dos países quanto à indústria em geral, o que abrange, por consequência, a Indústria 4.0.

Dado o estágio inicial de transição da estrutura produtiva da Indústria 3.0 para a Indústria 4.0, mesmo em economias mais desenvolvidas, não foram verificadas *condições de demanda* uniformes o suficiente para serem sistematizadas como as demais. Dessa forma, optou-se por não qualificar a referida variável na análise de competitividade proposta.

Estando os indicadores escolhidos para a avaliação das *condições dos fatores* e das *indústrias relacionadas e de apoio* bastante em linha com a descrição teórica do modelo utilizado, cabe uma breve justificativa a respeito da escolha do indicador para qualificar a *estratégia, estrutura e rivalidade das empresas*. O ponto-chave nesse quesito diz respeito às características desse segmento econômico: a reduzida complexidade de seus processos em comparação a grandes empresas garante às PMEs uma capacidade rápida de resposta a mudanças no ambiente econômico; além disso, incorrem em menores riscos de perdas ao ingressarem em projetos de P&D, fato que as estimula a assumirem um papel de protagonismo na promoção do desenvolvimento tecnológico nacional, apesar de contarem com uma menor quantidade de recursos próprios para tal (SCHWAB, 2016; PERESHYBKINA; CONDE; KALYESUBULA, 2017; ORTIZ; MARROQUIN;

CIFUENTES, 2020). A grande questão em torno das PMEs é, portanto, fazer com que o segmento mais representativo e com maior potencial dinâmico da economia dos países seja incorporado à nova era industrial, amplificando assim a disseminação dos ganhos de eficiência e produtividade.

3.2.1 Alemanha

A Alemanha é um dos países mais industrializados do mundo, reconhecido não apenas pela alta competitividade e inovação de suas indústrias manufatureiras, como também pela posição de vanguarda que ocupa nos campos de sistemas embutidos e engenharia de automação (AGRAWAL; KUMAR; TYAGI, 2020; KUO; SHYU; DING, 2019). O país foi um dos primeiros a incorporar o novo paradigma industrial ao projeto nacional com vistas a sua promoção ativa e planejada, além de ter sido pioneiro na identificação do arranjo de produção que se desenha enquanto uma nova fase do desenvolvimento industrial. A iniciativa *Industrie 4.0*, lançada em 2013, tem como principal objetivo promover a manutenção da posição mundialmente consolidada nos setores de manufatura e engenharia mecânica através de sua digitalização, protegendo assim a força de trabalho atuante nos segmentos e os investimentos em capital instalado realizados durante um longo período (KAGERMANN et al., 2016). Além do incentivo ao desenvolvimento industrial, o referido plano incorpora também a competitividade internacional e a sustentabilidade (AGRAWAL; KUMAR; TYAGI, 2020).

Em suma, a estratégia adotada pela Alemanha incorpora simultaneamente dois caracteres distintos. O primeiro, ativo, é representado a partir da elevação da produtividade de seus setores econômicos que denotam as maiores taxas de retorno e que, além disso, são fundamentais para a transição industrial: maquinário pesado, equipamentos eletrônicos e automóveis (NICK et al., 2019). Isso faz com que o processo de adoção do novo paradigma industrial ocorra a um custo de capital relativamente baixo frente a outros países, elevando sua velocidade e aprofundando a especialização do país na produção de novos equipamentos e no desenvolvimento das capacidades técnicas necessárias. Por fim, tal dinâmica acelera o alcance de um patamar de maturidade industrial que torna o país apto a consolidar sua posição mundialmente através de exportações (NICK et al., 2019).

O caráter defensivo, por outro lado, refere-se ao acirramento da competição mundial na indústria de manufatura. Dentre os três maiores exportadores do setor, a Alemanha figura na segunda posição, entre a China, principal fornecedor, e os EUA. Seus custos de produção

agregados são, contudo, os mais elevados dentre os países citados: de 19% a 21% mais representativos ante a China e 16% ante os EUA (ROSE et al., 2020). Tal impacto é verificado especialmente em termos da representatividade do custo da mão de obra, o que coloca a Alemanha em uma posição de risco caso tais patamares sejam mantidos no longo prazo (ROSE et al., 2020). Outros fatores de risco envolvem as iniciativas de outras economias desenvolvidas com vistas à elevação de sua produtividade e o aprimoramento das cadeias de valor asiáticas com relação à qualidade de sua produção (KUO; SHYU; DING, 2019). Frente a esse cenário, a Alemanha busca, portanto, evitar a perda de suas vantagens competitivas no setor, especialmente a partir da redução dos custos de produção trazida pela digitalização e automação da estrutura produtiva (FUCHS, 2018).

Com relação às *condições dos fatores*, o país se mostra relativamente competitivo em termos de especialização da mão de obra. A estrutura dual do sistema educacional alemão promove o ensino e o treinamento vocacional simultâneos ao longo de toda a trajetória acadêmica do estudante a partir do ensino médio, fazendo com que as transições entre as etapas e mesmo para o mercado de trabalho ocorram de forma orgânica e com mais objetividade (GEHRKE et al., 2015). Programas de mestrado e doutorado são bastante difundidos em todo o país com recursos advindos tanto do governo quanto de associações empresariais dos principais setores da economia (AGRAWAL; KUMAR; TYAGI, 2020). Embora o sistema educacional ainda seja majoritariamente voltado para o setor de manufatura nos moldes da Terceira Revolução Industrial, incorporando ao longo dos ciclos as habilidades especializadas voltadas ao processo de produção, não há indícios que apontem para uma dificuldade na alteração das diretrizes atuais com vistas ao desenvolvimento de aptidões mais condizentes com a nova disposição industrial (GEHRKE et al., 2015). Contudo, existe atualmente uma grande carência de recursos humanos capacitados à demanda de habilidades trazida pela Nova Revolução Industrial, fato que, aliado ao processo de envelhecimento populacional, pode agravar cada vez mais a necessidade que se incentive a vinda ao país de jovens trabalhadores imigrantes (AGRAWAL; KUMAR; TYAGI, 2020).

Outro fator relevante nesse âmbito é a grande quantidade de centros de pesquisa especializados: além de promoverem o avanço tecnológico, são também um indicativo da qualificação e, ainda, do grau de retenção de mão de obra especializada. Quanto ao desenvolvimento e à aplicação da IA na Alemanha em 2021, foram identificados 32 aplicações ou projetos em que a IA possui um papel de destaque, 35 instituições de pesquisa com foco em IA, 24 centros de transferência tecnológica do governo voltados a estratégias de aplicação de IA e 46 programas de estudo voltados à IA e à Ciência de Dados (ACATECH,

2021). Especial atenção tem sido dada à disseminação desta tecnologia devido ao potencial disruptivo que possui em termos de produtividade e de viabilização de outras tecnologias do novo paradigma industrial, tendo em vista a baixa adesão relativa de PMEs na incorporação desse tipo de tecnologia (ACATECH, 2021; FRANK; DALENOGARE; AYALA, 2019).

Ademais, a infraestrutura do país voltada ao suporte à Indústria 4.0 tem verificado avanços importantes: desde novembro de 2020, a Academia Nacional de Ciências e Engenharia (ACATECH) passou a ser responsável pelo desenvolvimento da plataforma nacional do projeto Gaia-X. Este tem por objetivo o estabelecimento de um ecossistema digital descentralizado que conecte infraestruturas digitais presentes em todos os integrantes da União Europeia (UE) (ACATECH, 2021). Com isso, busca-se fornecer suporte às PMEs no processo de digitalização de seus produtos, serviços e processos, bem como facilitar a implementação das regulações digitais que vêm sendo constituídas em âmbito do bloco econômico. A plataforma alemã conta com domínios ativos nos setores de agricultura, energia, finanças, sistemas de geoinformação, saúde, fabricação, mobilidade, setor público, cidades/regiões inteligentes e vida inteligente (ACATECH, 2021). Ainda no que tange à qualificação da infraestrutura, o país conta com um alto índice na métrica de infraestrutura de dados definida pelo Banco Mundial, atingindo 95 na pontuação máxima de 100, determinada pela instituição desde o início de sua publicação, em 2016, até 2019, publicação mais recente do dado (WORLD BANK, 2022f).

Grande parte do financiamento das iniciativas que envolvem a Indústria 4.0 no país advém de fundos mantidos pela UE. Estes possuem o objetivo de ampliar o conhecimento da sociedade empresarial a respeito do tópico, apoiar o surgimento de *startups* e de plataformas, fomentar projetos de pesquisa voltados à exploração dos aspectos de confiança, segurança, riscos, conformidade técnica/regulatória e padrões relativos à estrutura 4.0 (AGRAWAL; KUMAR; TYAGI, 2020). A partir disso, é verificado um efeito sinérgico com relação a outros fatores de produção, em que se pode observar um aumento significativo no número de novos programas de doutorado e pós-doutorado em torno do assunto nos últimos anos, junto à elevação do número de conferências para tratar dos mais diversos aspectos do novo paradigma industrial, desde a exposição crítica de seus potenciais impactos na produção e na sociedade até a definição de métricas para mensurar o grau de maturidade industrial e acompanhar o processo de transição (AGRAWAL; KUMAR; TYAGI, 2020; SCHUH et al., 2020).

O governo alemão, por outro lado, também participa diretamente da sustentação financeira em torno do desenvolvimento do setor industrial nacional. Linhas de financiamento

na soma de € 200 milhões foram concedidas por meio das contribuições do Ministério Federal da Educação e Pesquisa (*Bundesministerium für Bildung und Forschung*, BMBF) e do Ministério Federal da Economia e Proteção Climática (*Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz*, BMWK) – antigo Ministério Federal da Economia e Energia (*Bundesministerium für Wirtschaft und Energie*, BMWI) (THE DIGITAL TRANSFORMATION MONITOR, 2017). Nesta acepção, foram concedidos pelo BMBF € 120 milhões para atividades de pesquisa e outras propostas que buscassem desenvolver a área de sistemas de TICs com aplicação voltada a sistemas ciber-físicos, IoT e equipamentos industriais do novo paradigma. Parte desse recurso foi também destinada a plataformas de teste para o desenvolvimento de novas soluções, com foco voltado a PMEs. Ao BMWK é atribuída a responsabilidade de apoiar o esforço nacional em torno da padronização e regulação envolvendo a transição para o modelo industrial 4.0, tendo direcionado € 80 milhões a esse fim (THE DIGITAL TRANSFORMATION MONITOR, 2017).

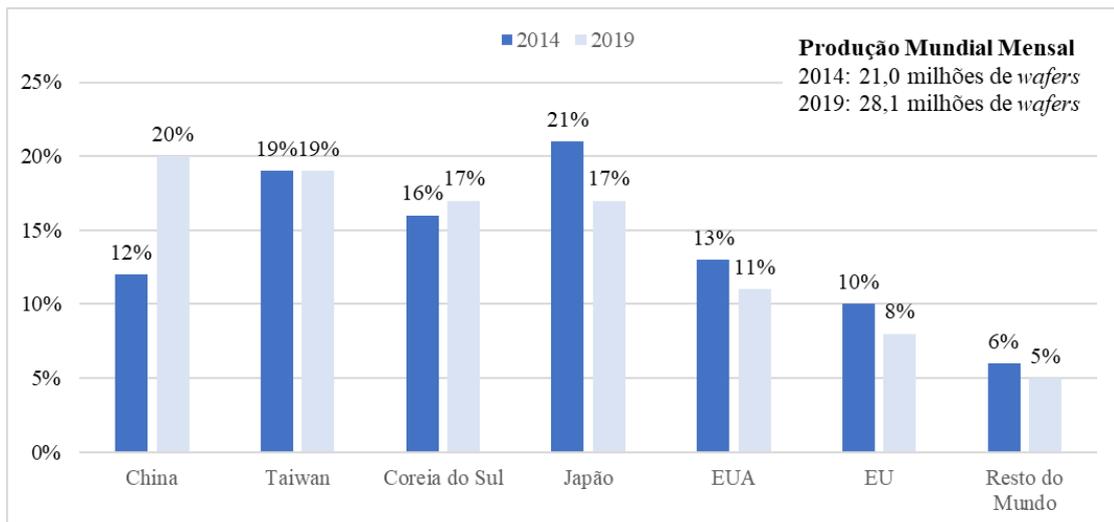
Outrossim, podem ser apontadas outras partes interessadas na viabilização financeira do plano nacional de desenvolvimento industrial e tecnológico. Como parte do acordo de financiamento, entidades privadas e associações inseridas em cada setor industrial fornecem contribuições em espécie e de financiamento para projetos de pesquisa dos quais participam. PMEs podem financiar até 60% do valor total de seus projetos por meio de recursos públicos, mas normalmente mantêm uma participação de 50%. Às grandes companhias é destinada uma parcela máxima de 50% na utilização de linhas do governo para o mesmo fim, norma estabelecida pela UE (THE DIGITAL TRANSFORMATION MONITOR, 2017).

O retorno do investimento total também varia de acordo com o tamanho da empresa: microempresas de tecnologia e TICs obtêm, em média, um retorno de 2:1 sobre o capital investido; PMEs, por outro lado, apresentam uma relação pouco abaixo de 4:1, enquanto grandes empresas convergem para 5:1 no mesmo indicador, contando, entretanto, com prazos significativamente mais alongados para que o retorno seja percebido (THE DIGITAL TRANSFORMATION MONITOR, 2017). Adicionalmente, em função do caráter incipiente de desenvolvimento da Indústria 4.0, não há uma definição clara e amplamente difundida a respeito de quais atividades se qualificam enquanto tal. Dessa forma, tanto o BMBF quanto o BMBK consideram pouco adequadas as métricas atuais utilizadas para mensurar a quantidade de recursos investidos pelo setor privado (THE DIGITAL TRANSFORMATION MONITOR, 2017).

A Alemanha conta também com linhas de financiamento para indústrias-base no que se refere ao fornecimento de componentes microeletrônicos. Este foi o primeiro setor

industrial classificado como “Projeto Importante de Interesse Comum Europeu” em termos do Artigo 107 (3)b do Tratado de Lisboa, que dispõe sobre o funcionamento da UE; tal fato garantiu ao país o acesso a € 1 bilhão em recursos para investimentos na atividade (ZVEI, 2021). Novos pleitos vêm sendo articulados em âmbito do bloco para a inclusão do setor de microeletrônica e tecnologias de comunicação nesse rol de projetos prioritários. Caso favorável, espera-se que a iniciativa possa direcionar um total de € 15 bilhões à Alemanha (ZVEI, 2021). Entretanto, cabe ressaltar que existem fortes indícios para que sejam verificadas restrições institucionais desses recursos, no sentido de serem destinados exclusivamente a atividades de P&D e primeira implantação industrial (ZVEI, 2021).

Com relação às *indústrias relacionadas e de apoio*, o panorama atual da Alemanha apresenta baixa representatividade no que concerne à produção de semicondutores mundial. Conforme destacado no Gráfico 1 abaixo, a produção europeia agregada correspondeu a apenas 8% do total produzido em 2019, apontando para um declínio de 2 pontos percentuais de sua participação desde 2014. Ademais, estimativas indicam que seriam necessários mais de três anos de investimentos de mais de € 350 bilhões para substituir a produção das fábricas localizadas em Taiwan (ZVEI, 2021). A criação de uma cadeia de valor nacional, por outro lado, demandaria investimentos de aproximadamente € 1 trilhão, além de gerar aumentos no preço dos componentes microeletrônicos em um espectro de 35% a 65% (ZVEI, 2021). Isso faz com que seja imprescindível a articulação, por parte do país, de uma cadeia de valor internacional em torno do setor, mesmo que isso signifique uma maior suscetibilidade a choques externos (NICK et al., 2019).

Gráfico 1: Distribuição da produção mundial de semicondutores (incluindo fundições).⁷

Elaborado pelo autor com base em ZVEI (2021, p. 17).

Contudo, têm sido verificados alguns esforços recentes que visam a internalização da produção na medida em que tal processo é viável. Em junho de 2021, a empresa alemã Robert Bosch GmbH inaugurou sua mais nova planta fabril voltada à produção de microchips na cidade de Dresden. A planta de 72 mil m² demandou um investimento aproximado de € 1 bilhão, já adequada ao novo paradigma industrial: conta com uma linha de produção autônoma viabilizada por IA, serviços de manutenção coordenados a 9 mil quilômetros de distância e utilização de óculos de realidade aumentada, além da operacionalização de seu *Digital Twin* (BOSCH, 2021). Outra iniciativa é verificada por parte da empresa estadunidense Intel, que anunciou em março de 2022 a destinação de € 17 bilhões para a construção de uma nova fábrica de semicondutores na cidade alemã de Magdeburgo, estando o início da construção da planta programado para 2023, com expectativas de início da produção para o ano de 2027 (GARTENBERG, 2022).

O setor de *software* na Alemanha, embora não apresente o mesmo nível de prioridade de investimentos, segue sendo o maior da Europa em termos de fluxo monetário. Contando com empresas relevantes como SAP e Software AG, o setor verificou um faturamento agregado de € 23 bilhões, correspondendo a 22,3% do mercado europeu em 2017 (GERMANY TRADE AND INVEST, 2019).

A influência governamental é também verificada sobre as *indústrias relacionadas e de apoio*, especialmente em torno do tópico de padronização. As diretrizes gerais são

⁷ “*Wafer*: Uma fatia fina de um material semicondutor em que são feitos dispositivos semicondutores. Também chamado de fatia ou substrato” (LAPLANTE, 2000, p. 758, tradução nossa); dados normalizados à produção de wafers de 200 milímetros.

determinadas pelo governo em conjunto com uma série de empresas de alta capacidade inovativa e um pequeno grupo de pesquisadores pioneiros nos setores, sendo a transparência dos padrões utilizados um pré-requisito já estabelecido, bem como o emprego predominante de uma abordagem baseada no diálogo com o objetivo de criar um amplo consenso (KAGERMANN et al., 2016). Tal estrutura, no entanto, pode representar riscos ao desenvolvimento industrial. O risco da perda de agilidade no processo de formação de um consenso pode refrear o avanço em diversas frentes com relação a outros países, bem como pode tornar as atividades de padronização demasiadamente complexas, impedindo sua adoção por parte de PMEs e estimulando empresas nacionais de maior porte a buscarem suporte em plataformas de desenvolvimento e troca de informações em outros países (KAGERMANN et al., 2016).

Por fim, a conjuntura nacional a respeito da *estratégia, estrutura e rivalidade das empresas* denota oportunidades de desenvolvimento. Apesar de serem consideradas o fator com maior capacidade de inovação e tecnologia na economia alemã, o segmento de PMEs, que representa 99,6% das empresas do país, fica atrás em termos de digitalização e Indústria 4.0 em comparação aos demais (PERESHYBKINA; CONDE; KALYESUBULA, 2017; AGRAWAL; KUMAR; TYAGI, 2020). Pouco menos de 5% das PMEs alemãs já adotaram alguma tecnologia que caracteriza a Indústria 4.0 e apenas um terço delas estão considerando sua transição para o novo paradigma industrial em seu planejamento (PERESHYBKINA; CONDE; KALYESUBULA, 2017). Algumas razões podem ser elencadas para justificar tal atraso, a iniciar pelo simples fato de que muitas delas ainda não possuem os componentes básicos que viabilizam o novo paradigma industrial, como sistemas de transmissão, processamento e armazenamento de informações e infraestrutura física. Ademais, o desenvolvimento de padrões e normas amplamente reconhecidas é ainda incipiente tanto em âmbito nacional quanto internacional. Tal fato desencoraja os investimentos com recursos próprios no referido extrato de empresas por não haver um grau satisfatório de certeza a respeito da interoperabilidade entre diferentes sistemas, elevando o risco de um isolamento tecnológico (PERESHYBKINA; CONDE; KALYESUBULA, 2017; KAGERMANN et al., 2016). Por fim, existe também uma preocupação em torno da modificação do local de trabalho e as perdas de emprego que essas transformações podem acarretar (PERESHYBKINA; CONDE; KALYESUBULA, 2017).

3.2.2 China

O peso da produção industrial na economia chinesa é maior do que em qualquer outro país do mundo. A indústria manufatureira correspondeu a 39,4% do Produto Interno Bruto (PIB) do país em 2021, registrado em \$ 27,3 trilhões considerando-se a Paridade do Poder de Compra (PPC), frente a uma participação do mesmo segmento de 26,6% na Alemanha e de 18,4% nos EUA no mesmo ano, com PIBs respectivos de \$ 4,8 trilhões e \$ 23 trilhões, também mensurados em termos da PPC (WORLD BANK, 2022a; WORLD BANK, 2022b). Desde o final do Século XX, a indústria de transformação chinesa tem se desenvolvido rapidamente, tendo sido verificada a construção de diversos sistemas industriais independentes, que contribuíram para a modernização e desenvolvimento econômico do país (KUO; SHYU; DING, 2019). Contudo, a indústria de transformação chinesa ainda se mostra bastante voltada à produção em massa de baixo custo, explorando principalmente a grande disponibilidade de espaço físico e de mão de obra barata, atraindo investimentos de diversas empresas estrangeiras (KAGERMANN et al., 2016). Tal configuração acarreta lacunas importantes na capacidade de inovação endógena, na utilização eficiente de recursos, na infraestrutura industrial e no nível, qualidade e relevância da informação gerada com vistas ao aperfeiçoamento do processo produtivo (KUO; SHYU; DING, 2019).

Ciente do cenário supracitado, o governo chinês tem definido metas agressivas para aproveitar o momento de transição do paradigma industrial de forma a revitalizar a estrutura fabril do país e acelerar o desenvolvimento econômico. Dessa forma, é planejada a alteração do foco industrial do país na quantidade para o estabelecimento de vantagens qualitativas ao longo de toda a cadeia de valor (KUO; SHYU; DING, 2019). Ademais, tal movimento antecipará adversidades já verificadas a partir do esgotamento do modelo atual: o crescimento dos salários é verificado atualmente a uma taxa anual próxima a 20% (KAGERMANN et al., 2016). A meta definida pela administração central do Estado é de alcançar o status de superpotência global na indústria de manufatura e cibernética e nos setores de ciência e inovação tecnológica até 2049, ano em que se comemorará o 100º aniversário da proclamação da República Popular (ARCESATI et al., 2020).

O alcance de tal objetivo está condicionado ao atingimento das diretrizes propostas em três planos nacionais distintos. O primeiro, anunciado em 2015 com o nome “Made in China 2025”, determina o estabelecimento, até 2025, de uma indústria de transformação competitivamente consolidada a partir de uma série de iniciativas: a disseminação de TICs nas plantas fabris viabilizará a integração total dos processos e sistemas industriais, elevando

assim a qualidade da produção e o valor agregado por unidade produzida e diminuindo o consumo de energia, o consumo de materiais e a emissão de poluentes (KUO; SHYU; DING, 2019). O segundo, intitulado “China Standards 2035”, remete ao estabelecimento de uma capacidade líder em inovação tecnológica em uma indústria nacional que estará em situação de paridade com as economias mais avançadas em termos de desenvolvimento e estrutura até o ano de 2035 (ARCESATI et al., 2020; KUO; SHYU; DING, 2019). A última etapa, ainda sem uma denominação definida, diz respeito à articulação de todos os componentes estruturados nos planos anteriores para que se possa superar a performance industrial das economias concorrentes, atingindo a meta estratégica até 2049 (KUO; SHYU; DING, 2019).

Com relação às *condições dos fatores*, a China apresenta algumas lacunas relativas à disponibilidade de mão de obra qualificada. Embora o país tenha verificado avanço significativo nos últimos anos, tendo sido registrado um total de alunos graduados em 2018 de 7,5 milhões de pessoas, número 10,6% maior em relação ao verificado em 2015 quando do lançamento do plano “Made in China 2025” (NATIONAL BUREAU OF STATISTICS OF CHINA, 2022a), grande parte da mão de obra recém-empregada precisa passar por novos processos de treinamento para ser adaptada à rotina de trabalho. Dessa forma, comparada a países desenvolvidos, a eficiência da mão de obra por unidade produzida considerando-se a indústria de transformação chinesa é relativamente baixa (SUN et al., 2020). Ainda, cabe destacar que se espera uma demanda de aproximadamente 1,8 milhão de analistas de dados para os próximos anos na China, número que se apresenta hoje em 300 mil (ARCESATI et al., 2020).

No entanto, algumas condições já verificadas atualmente podem servir como ponto de partida para o fortalecimento do nível de qualificação da massa de trabalho no país. Além da formação anual de um número de universitários equivalente ao total da força de trabalho de Áustria e Dinamarca (WORLD BANK, 2022c), outra evolução que indica o aumento gradativo do nível de instrução do trabalho na China é o aumento no número de estudantes que concluem cursos de graduação e pós-graduação em universidades no exterior e retornaram ao país: em 2018, alcançou a marca de 519 mil pessoas, representando um crescimento de 27,0% ante 2015 (NATIONAL BUREAU OF STATISTICS OF CHINA, 2022b). Tal indicador pode ser encarado como um avanço no poder de atração de talentos mundiais por parte da China (LI, 2018). Ademais, estudantes com esse tipo de formação foram especialmente importantes no sucesso da inserção mundial da economia chinesa nos últimos 40 anos. Isso se deve à tentativa de integração dos conceitos do Marxismo-Leninismo, da economia de mercado e da economia planificada, aprendidos

através do contato com o Ocidente, à filosofia, cultura e história chinesa, que deu origem à nova via do Socialismo com características chinesas (LI, 2020). Exemplos relevantes a respeito do tema são Deng Xiaoping, responsável pela reforma econômica nacional em 1978, e Zhou Enlai, o primeiro a assumir o posto de primeiro-ministro da República Popular da China, que passaram alguns anos estudando na França (LI, 2020).

Apesar de não contar com um alto número de centros especializados em atividades de P&D frente aos países desenvolvidos, a China ainda assim apresenta características que promovem grande avanço tecnológico. Dentre universidades, grandes empresas de tecnologia e institutos de pesquisa, existem 30 entidades envolvidas diretamente em pesquisas avançadas na aplicação e aprimoramento da tecnologia de IA (HANNAS et al., 2022). A força da economia chinesa na promoção de tecnologias de ponta está, contudo, relacionada à presença de grandes companhias nacionais nesses setores, como condução autônoma e a própria IA (ARCESATI et al., 2020).

Contando com acesso a plataformas de internet industrial – infraestrutura que têm sido priorizada pelo governo tanto no que diz respeito à destinação de recursos próprios quanto na determinação do direcionamento de recursos das grandes empresas do país, sobre as quais possui um importante poder de influência –, esses agentes são capazes de já experimentar uma das características da evolução dos negócios na Indústria 4.0: o acesso a dados de uma quantidade expressiva de usuários é utilizado como fonte para otimizar o modelo dos produtos e o processo de sua fabricação (ARCESATI et al., 2020). Exemplos a esse respeito podem ser identificados: i) a empresa de serviços de internet Tencent, cujo aplicativo de mensagens chega a ter mais de 1 bilhão de usuários mensais ativos; ii) a varejista Alibaba, que criou a partir de sua plataforma de comércio online um centro de inovações capaz de auxiliar vendedores na customização de produtos por meio do acesso a um banco de dados de com informações de 600 milhões de usuários; e iii) a provedora de recursos digitais de busca Baidu, cuja plataforma de desenvolvimento aberta voltada à tecnologia de veículos autônomos conta com 12 mil desenvolvedores ao redor do mundo, além de 130 parceiros corporativos, inclusive algumas das principais montadoras alemãs (ARCESATI et al., 2020).

A infraestrutura chinesa em termos de suporte à Indústria 4.0 conta com especial ênfase sobre a constituição de uma ampla rede de internet industrial. São identificados 201 provedores de plataformas dessa natureza ao longo do território nacional, de vários tamanhos, estágios de maturidade e focos setoriais (ARCESATI et al., 2020). Contudo, mesmo especialistas chineses reconhecem a falta de agentes capazes de integrar as soluções ofertadas no mercado nacional, tornando necessária a cooperação com empresas multinacionais como

Bosch, SAP e General Electric, e estimulando o desenvolvimento a partir de modelos colaborativos, uma vez que nenhum agente é capaz de prover soluções integradas de infraestrutura de nuvem, conexão e análise de dados (ARCESATI et al., 2020). Ademais, os governos provinciais e municipais passaram a estabelecer metas a partir de 2019 a respeito do número de empresas que devem ser totalmente inseridas em ambientes de nuvem regionais. Aproximadamente 463 mil empresas fazem parte dessa iniciativa, estando as concentrações mais relevantes de centrais de processamento e armazenamento de dados na porção nordeste do território, próxima à fronteira com a Mongólia, que conta com 158 mil gabinetes (*hardware*) voltados a esse objetivo, e na porção centro-sudeste, com 178 mil gabinetes (*hardware*) (ARCESATI et al., 2020). Frente ao exposto, é verificada uma constante evolução no índice de infraestrutura de dados divulgado pelo Banco Mundial a respeito da China, atingindo em 2019 a marca de 65 do total de 100 pontos (WORLD BANK, 2022e).

Com relação às condições de financiamento, o governo vem buscando diversificar a forte participação dos subsídios, ainda predominantes, com alternativas trazidas pela incorporação de aspectos da economia de mercado ao assim denominado Socialismo com características chinesas (ARCESATI et al., 2020). Os arranjos e seus exemplos, juntamente às respectivas relevâncias em termos monetários, podem ser verificados na Tabela 1. Ademais, a China tem investido fortemente para aperfeiçoar seus recursos tecnológicos, fato comprovado pela destinação de € 337 bilhões em 2018 ao setor de tecnologia da informação, dos quais € 32 bilhões foram destinados à criação de sistemas de software e centrais de dados (ARCESATI et al., 2020).

Tabela 1: Fontes de financiamento para plataformas industriais digitais na China.⁸

Modalidade de Financiamento	Exemplos
Subsídios regionais em espécie.	Aproximadamente CNY 20 mil por empresa que se conecte à plataformas de nuvem.
Aquisições do governo nacional via Ministério da Indústria e Tecnologia da Informação (MITI).	Mais de CNY 3 bilhões para o desenvolvimento estratégico de plataformas de internet industrial.
Subsídios de governos provinciais para participações em licitações públicas.	Limite de 20% a 30% do total financiado, não podendo exceder a soma de CNY 2 a 5 milhões.
Parcerias entre empresas estatais e fundos locais do governo.	China Electronics Corporation e a cidade de Changsha investiram CNY 2 bilhões na criação de uma empresa de internet industrial.
Financiamento corporativo: grandes companhias desenvolvem e operacionalizam plataformas por conta própria, muitas vezes a partir da criação de subsidiárias voltadas a esse fim.	A estatal China State Shipbuilding Corporation investiu CNY 50 milhões para criar sua ramificação de internet industrial.
Atração de investimentos estrangeiros.	Captação de CNY 500 milhões por parte da desenvolvedora de plataformas de internet industrial Rootcloud.
Emissão de ações: ainda não ocorreram em âmbito da indústria de transformação, mas já denotaram sucesso em empresas de desenvolvimento de plataformas.	Oferta inicial de ações da empresa Foxconn Industrial Internet na bolsa de valores de Xangai, em 2018.

Elaborado pelo autor com base em Arcesati et al. (2020, p. 36).

Quanto às *indústrias relacionadas e de apoio*, a China tem verificado avanço considerável no setor de produção de semicondutores nos últimos anos. Dentre os seis principais produtores do segmento no mundo, a China alcançou em 2020 a quarta posição no que se refere à capacidade de produção de *wafers*, atingindo a marca de pouco mais de 3 milhões de componentes mensais, atrás de Japão, Coreia do Sul e Taiwan, apresentando o primeiro uma capacidade de pouco mais de 3 milhões de componentes por mês, e os dois últimos de mais de 4 milhões por mês (ZVEI, 2021). Em 2010, o país contava com uma produção de pouco mais de 1 milhão de *wafers*, ocupando a quinta posição do ranking, pouco à frente da UE e atrás dos EUA, que contavam com uma produção de quase 2 milhões de componentes (ZVEI, 2021).

O mercado de semicondutores chinês foi mensurado em US\$ 186,5 bilhões em termos de faturamento no ano de 2021. Destes, uma fatia de US\$ 31,2 bilhões foi relativa a *chips* fabricados em território nacional – incluindo empresas nacionais e multinacionais –, o que representa uma autossuficiência de 16,7%, indicador ainda baixo (WANG, 2022). A iniciativa “Made in China 2025” prevê o atingimento de um índice de autossuficiência de 75% a ser atingido até 2030, prevendo, portanto, pesados investimentos na estrutura fabril nacional. Projeta-se a construção de 31 novas fábricas de *chips* até o fim de 2024, superando em quantidade as novas instalações esperadas em Taiwan e nos EUA, 19 e 12, respectivamente, considerando o mesmo período (WANG, 2022).

⁸ Valores em CNY, *Chinese Yuan*, unidade monetária básica da China.

Outros setores de suporte à digitalização da economia, contudo, não acompanham o mesmo ritmo de desenvolvimento. Os exemplos mais ilustrativos dessa realidade são: i) o volume de importações de sensores de ponta, que correspondem a 80% de toda a demanda doméstica; ii) o volume de importações de CLPs, que atingiu 95% do total utilizado na economia em 2019, o que gera também problemas relacionados à interoperabilidade dos dispositivos de diferentes fabricantes; e iii) a grande dependência de companhias estrangeiras no que tange o fornecimento de *softwares* industriais (90% dos produtos utilizados), como SAP, Microsoft e Salesforce (ARCESATI et al., 2020).

Por fim, cabe a análise do setor de PMEs chinês. De forma semelhante ao verificado no caso alemão, esse segmento é também bastante relevante na China: 97,9% das empresas nacionais são enquadradas nessa categoria (MÜLLER; VOIGT, 2018). Contudo, tais agentes ainda encontram dificuldades em reconhecer o potencial de agregação de valor trazido por soluções baseadas na análise de dados em etapas da cadeia de valor, como a modelagem de produtos ou a manutenção preventiva (ARCESATI et al., 2020). Em estudo com grupo de 222 PMEs na Alemanha e 107 PMEs na China, Müller e Voigt (2018) concluem que, comparativamente às empresas alemãs, as empresas chinesas esperam maiores desafios em relação à adoção do novo paradigma industrial.

Tal fato pode ser considerado como indicador do menor grau de profundidade das mudanças em curso em relação ao país europeu. Outro detrator que impede o avanço da inserção das PMEs chinesas na Indústria 4.0 diz respeito ao baixo grau de padronização da segurança e da propriedade de dados (ARCESATI et al., 2020). Apesar dos incentivos verificados em torno da integralização da economia em uma plataforma digital viabilizada por provedores de internet industrial, ainda existe um número considerável de empresas que se encontram isoladas por mais de um motivo: i) possuem sistemas de informações incompletos; ii) desenvolveram, a partir da integração com plataformas de outras empresas, soluções próprias que acabam sendo incompatíveis com as tecnologias mais difundidas – ilhas digitais; ou iii) estão iniciando o processo de introdução da produção integrada via computadores (Indústria 3.0) (ARCESATI et al., 2020; KAGERMANN et al., 2016).

3.3 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

Frente ao problema central do trabalho, este capítulo estabeleceu o ferramental teórico utilizado, capaz de analisar as principais variáveis econômicas com potencial para desenvolver a Indústria 4.0 de forma competitiva. A partir disso, foram avaliadas duas das

mais bem-sucedidas experiências internacionais em curso na implementação da Indústria 4.0 para que se pudesse identificar tanto o avanço deste processo até então quanto as iniciativas que estão sendo executadas com a finalidade de sustentá-lo. Sendo assim, o ponto de referência internacional que se buscava estruturar tendo em vista o alcance do objetivo geral do presente trabalho, foi concluído. Ademais, três objetivos específicos foram alcançados com base nas considerações deste capítulo, quais sejam: examinar as abordagens teóricas sobre a competitividade dos países; analisar o modelo do Diamante Competitivo, proposto por Porter; e avaliar vantagens competitivas de dois dos países mais avançados em termos da Indústria 4.0.

4 INDÚSTRIA 4.0: O CASO BRASILEIRO

O presente capítulo integra as discussões e análises propostas até aqui à realidade brasileira. Destarte, a seção 4.1 é dedicada à análise das vantagens competitivas relativas à Indústria 4.0 no país mediante a aplicação do modelo do Diamante Competitivo, considerando-se os mesmos parâmetros utilizados nos estudos de caso de Alemanha e China realizados no capítulo anterior. À seção 4.2 cabe, a partir dos resultados das análises das vantagens competitivas de Alemanha, China e Brasil, elencar a priorização de atuação de uma eventual política industrial brasileira voltada ao novo paradigma industrial sobre cada fator avaliado (*condições dos fatores, indústrias relacionadas e de apoio, estratégia, estrutura e rivalidade das empresas e governo*). A seção 4.3 apresenta considerações preliminares a respeito do atingimento dos objetivos do presente trabalho a partir deste capítulo.

4.1 A INDÚSTRIA 4.0 NO BRASIL

A indústria de transformação brasileira vem apresentando tendência declinante nos últimos anos (e mesmo décadas) frente ao desempenho verificado no mundo. O país experimentou uma redução de 1,35% em 2019 para 1,32% em 2020 no que diz respeito à participação da produção industrial brasileira frente ao agregado do mundo – em contraste a uma representatividade de 1,90% em 2013 – a evolução recente dos indicadores de crescimento anuais da indústria levam a crer que a esse processo de diluição seguirá ocorrendo nos próximos anos (PERFIL DA INDÚSTRIA BRASILEIRA, 2022). Após recuar 4,8% em 2020 frente ao registro do ano anterior, a produção da indústria de transformação brasileira apenas compensou esse desvio em 2021, crescendo 4,9% (IEDI, 2022a). Movimento diferente foi verificado para a média mundial do produto deste segmento econômico: após diminuir seu desempenho em 4,2% em 2020, apresentou no ano seguinte um aumento de 9,4%. Mesmo em comparação à média de outros grupos de países, mais próximos à realidade socioeconômica do Brasil, a indústria doméstica demonstrou desempenho inferior, tendo sido o incremento observado na média dos países emergentes (exceto China) e da América do Sul de, respectivamente, 10,0% e 9,3% em 2021 (IEDI, 2022a).

Muito atrelado ao fraco desempenho supracitado, e considerando o Diamante Competitivo de Porter, está a sucessiva falta de um plano nacional centralizado, voltado ao desenvolvimento do setor, a partir da virada para os anos 2000 e que perdura até hoje. Embora estruturadas a partir de pressupostos condizentes com a realidade econômica do país – baixo

dinamismo da economia como um todo, bem como o processo de primarização –, as políticas industriais executadas ao longo do período foram incapazes de estabelecer uma estratégia sólida que viabilizasse o aprofundamento da especialização da indústria nacional – premissa básica da construção de vantagens competitivas, conforme Porter (1990a) –, especialmente em setores de alta densidade tecnológica (VIEIRA; OURIQUES; AREND, 2021). Dessa forma, o cenário atual é composto por um agregado de problemas estruturais em termos de política industrial, quais sejam “ausência de uma política de Estado, falta de continuidade, recursos financeiros insuficientes e incerteza na execução orçamentária” (VIEIRA; OURIQUES; AREND, 2021, p. 28).

Como resultado, verifica-se a manutenção de um progresso tecnológico característico da (semi-)periferia: o sistema endógeno de inovação é marcado majoritariamente por estratégias de *catching-up* com foco sobre o aumento de produtividade e consequente redução de custos (VIEIRA; OURIQUES; AREND, 2021). A indústria brasileira provou ainda não ter adotado tecnologias promissoras da Indústria 4.0, a exemplo da consolidação de ambientes de *Big Data*, serviços de nuvem voltados à fabricação e outras que buscam promover a digitalização da planta fabril e a performance dos produtos (DALENOGARE et al., 2018). Ademais, de forma a corroborar a predominância do constante processo de emparelhamento, há indícios de que a adoção de recursos de computação em nuvem por parte de algumas empresas tem ocorrido com foco na implementação da armazenagem remota de dados, sem que suas principais capacidades (armazenamento de dados gerados em tempo real com acesso amplamente difundido) sejam exploradas (FRANK; DALENOGARE; AYALA, 2019).

Quanto às *condições dos fatores*, o Brasil apresenta-se especialmente defasado em termos de constituição de um contingente de trabalhadores especializados e aptos a articular tarefas condizentes com os requerimentos da Quarta Revolução Industrial. A estrutura educacional brasileira se constitui enquanto um dos casos mais marcantes, a nível mundial, de incompatibilidade entre o sistema de ensino e as novas habilidades requeridas em profissionais que farão parte da Indústria 4.0: as formas passivas de aprendizagem, caracterizadas pela aplicação de métodos de instrução direta e memorização, são ainda predominantes, o que ocorre em detrimento da aplicação de métodos interativos que estimulem o pensamento crítico e individual essencial para a promoção da inovação (RIBAS NETO; FIORIN, 2021). Em estudo realizado pelo Fórum Econômico Mundial (FEM) em 2019 para mensurar a capacidade dos países no domínio da Quarta Revolução Industrial no que tange às habilidades da força de trabalho, dentre 141 países, o Brasil apresenta um dos piores desempenhos avaliados, à frente apenas de oito outros países (WEF, 2020).

A educação profissional é outra das lacunas observadas no sistema educacional do país. Tanto o direcionamento do conhecimento técnico necessário para a operação de sistemas digitais e maquinário complexos, principalmente informática, matemática, tecnologia da informação e robótica, quanto o desenvolvimento de competências de flexibilidade e colaboração são imprescindíveis para a consolidação da base de profissionais aptos a promover alterações na estrutura produtiva nacional com vistas à transição do paradigma (SOUZA; VIEIRA, 2020). Ademais, outro aspecto que dificulta a qualificação profissional da mão de obra é a falta de uma estrutura integrada de ensino e experiência prática no setor produtivo, que, associado às demais defasagens apontadas, criam um contexto de alta demanda por profissionais nos setores tecnológicos e de programação mesmo em momentos em que a taxa de desemprego se encontra também elevada (SOUZA; VIEIRA, 2020; RIBAS NETO; FIORIN, 2021).

O Brasil, enquanto economia subdesenvolvida, conta ainda com outros problemas relativos ao mercado de trabalho na Quarta Revolução Industrial. A velocidade com que mais tarefas são automatizadas, especialmente aquelas de baixa complexidade, conforme tratado na seção 2.4 do capítulo 2, elevam o risco de desemprego de grande parte da população, que ainda se encontra desempenhando funções com tais características. Nesse sentido, Rosa e Calvete (2020) elencam três opções que poderiam ser incluídas a esse debate para endereçar o potencial problema, tendo sido inclusive pautadas pela experiência de outros países: a renda básica única, a negociação coletiva e a redução do tempo de trabalho.

A primeira consiste em um complemento aos programas sociais e aos serviços públicos oferecidos pelo Estado com vistas à garantia de uma renda mínima capaz de sustentar os gastos individuais com necessidades básicas. Uma série de países já lançou mão de programas dessa natureza ao longo da história para lidar com adversidades que se colocavam – Dinamarca, Inglaterra, Alemanha, Holanda, Bélgica, Irlanda, Luxemburgo, França e, mais recentemente, Finlândia. A questão central em um momento de transição de paradigma industrial, cujo potencial de impactos sobre o trabalho não apresenta precedentes em revoluções industriais anteriores, é aproveitar parte dos exponenciais ganhos de produtividade do capital para garantir a seguridade social daqueles que, eventualmente, forem condicionados ao afastamento da massa produtiva de trabalho, além da manutenção dos níveis de consumo (ROSA; CALVETE, 2020).

Conforme pontuam Rosa e Calvete (2020), iniciativa similar foi instituída no Brasil pela Lei nº 10.835/2004, que:

[...] instituiu, a partir de 2005, a renda básica de cidadania, em nível nacional, que se consiste (sic) no direito de todos os brasileiros residentes no País e estrangeiros aqui residentes há pelo menos 5 (cinco) anos, não importando sua condição socioeconômica, receberem, anualmente, um benefício monetário. Esse benefício deveria ser de igual valor para todos e suficiente para atender às despesas mínimas de cada pessoa com alimentação, educação e saúde. O pagamento estaria condicionado ao “grau de desenvolvimento do País e as possibilidades orçamentárias”, cabendo ao Poder Executivo definir seu valor (ROSA; CALVETE, 2020, p. 251 e 252).

O programa, contudo, não apresenta evidências práticas de implementação devido ao seu condicionamento à situação orçamentária da União. Outro ponto de discussão a respeito do tema está relacionado ao caráter irrestrito da concessão do benefício: a não-exigência da comprovação de situação socioeconômica específica, o que em tese facilitaria o acesso e reduziria os custos de implementação do programa, eleva o risco de que sejam gerados estímulos a ociosidade por parte dos beneficiários (ROSA; CALVETE, 2020).

A negociação coletiva, por outro lado, propõe o diálogo entre empregadores e empregados através da mediação conduzida por entidades coletivas, em especial, os sindicatos. Estes, juntamente ao Estado, estariam incumbidos de proteger os interesses dos trabalhadores, tidos como elo mais frágil em relação ao capital, pauta bastante importante dado o momento de discussão a respeito da reestruturação da organização da produção na economia (ROSA; CALVETE, 2020). A recente reforma trabalhista estabelecida no Brasil a partir da Lei nº 13.467/2017, apesar de pautada em diretrizes que buscavam pacificar as relações de trabalho, fortalecer as negociações coletivas, incentivar as soluções extrajudiciais de controvérsias e respeitar a autonomia coletiva da vontade, alterou significativamente as prerrogativas práticas de atuação em favor dos empregadores (ROSA; CALVETE, 2020). Dessa forma, foi constatada a diminuição da presença sindical na mediação das relações de trabalho a partir de algumas medidas estabelecidas na reforma em questão, a exemplo da redução das condições de financiamento dos sindicatos e da prevalência do negociado sobre o legislado (ROSA; CALVETE, 2020).

A terceira opção especificada diz respeito à redução da jornada de trabalho. Esta, apesar de prevista por lei como sendo composta por 44 horas semanais no Brasil, acaba sendo estendida na prática em função da realização de horas extras de trabalho, havendo inclusive mecanismos legais que permitem às empresas a requisição de horas de trabalho extraordinárias a seus empregados (ROSA; CALVETE, 2020). Embora tal elevação do período de trabalho não ocorra, ao menos não legalmente, sem que haja a devida compensação monetária, fato é que tais processos reduzem, em boa parte dos casos, a

qualidade de vida dos empregados, além de servir às empresas como um mecanismo de compensação de suas necessidades produtivas (ROSA; CALVETE, 2020).

Este último ponto, especificamente, apresenta bastante relação com o modelo do Diamante Competitivo no que se refere à *condição dos fatores*: arranjos regulatórios que permitam às empresas um certo controle sobre a quantidade de horas trabalhadas por seus empregados geram, teoricamente, um desincentivo à inovação (seja ela tecnológica, organizacional, processual, etc.), com potencial inclusive para sustentar ineficiências operacionais. O progresso técnico é geralmente vislumbrado enquanto marco zero, responsável por conferir à estrutura produtiva ganhos de eficiência que, por sua vez, reduziram historicamente a demanda por trabalho em termos da jornada do empregado, diferença essa que tem ficado cada vez mais clara ao se comparar economias desenvolvidas e subdesenvolvidas. Entretanto, cabem também análises a respeito de como a escassez controlada de determinados fatores de produção, nesse caso, o trabalho, pode afetar positivamente a competitividade industrial a partir do estímulo gerado à inovação.

Há ainda o debate a respeito dos efeitos econômicos da redução da jornada de trabalho. De um lado, as teorias econômicas clássica e neoclássica destacam o efeito negativo sobre nível de emprego devido à elevação dos custos de produção; de outro, pensadores pós-keynesianos veem o impacto positivo do aumento salarial advindo de uma redução do período de trabalho como um impulsionador da demanda agregada, gerando uma necessidade de aumento da produção por parte das empresas que seria viabilizada pela contratação de mais trabalhadores (ROSA; CALVETE, 2020). A partir da ótica proposta por Porter (1990a), os efeitos do encurtamento da jornada de trabalho seriam igualmente benéficos no longo prazo, uma vez que a ampliação da pressão sobre as empresas aceleraria a velocidade com que estas incorporam ao ambiente econômico métodos e recursos tecnológicos inovadores capazes de ampliar o excedente gerado e de, eventualmente, criar condições para o surgimento de novos mercados e linhas de negócio.

Os incentivos governamentais à inovação seguiram rumo similar ao setor industrial em termos de condução política. Verifica-se a ausência de diretrizes claras de atuação, abrindo margem para uma falta de continuidade nos esforços perpetrados e para a incerteza na execução orçamentária frente a uma realidade de recursos financeiros escassos (DE NEGRI, 2018). Isso acaba contrapondo uma das características mais esperadas do investimento em P&D, qual seja, a previsibilidade. O tempo demandado para que se desenvolvam projetos dessa natureza, cujo impacto seja relevante, envolve, na grande maioria das vezes, mais de uma etapa de execução e parcerias entre diferentes instituições (DE NEGRI, 2018). Não

sendo essa uma característica do financiamento público brasileiro à ciência e tecnologia em uma perspectiva histórica, foram criados os Fundos Setoriais em finais da década de 1990, que posteriormente passaram a integrar o Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FNDCT). Os recursos desses fundos seriam constituídos a partir de impostos e contribuições arrecadados em diferentes setores da atividade econômica nacional, sendo a principal fonte de arrecadação parcela dos royalties do petróleo produzido no país, o que garantiria uma previsibilidade do fluxo de recursos a partir do acompanhamento do nível de atividade econômica nacional (DE NEGRI, 2018).

Conforme a arrecadação dos fundos cresceu ao longo do tempo, contudo, o governo brasileiro passou a reduzir o orçamento basal do atual Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI). Embora tal medida não tenha impedido o aumento absoluto dos recursos destinados ao órgão até 2013, quando atingiu a marca de mais de R\$ 11 bilhões, a aprovação da lei do petróleo, no mesmo ano, determinando a destinação de todos os recursos provenientes dos royalties aos setores de saúde e educação, trouxe mudanças significativas às condições de financiamento da ciência e tecnologia no Brasil (DE NEGRI, 2018). A partir de então, e não apenas em função disso, o orçamento ministerial para ciência e tecnologia passou a experimentar sucessivas quedas, deixando de garantir a previsibilidade que se almejava. O Fundo Setorial do Petróleo (CT-Petro), ao qual eram destinadas as arrecadações com base nos royalties de petróleo até então, representou a principal perda em termos do orçamento ministerial, dada sua representatividade no FNDCT. Este, em conjunto com o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), representam as principais fontes de financiamento da ciência brasileira, que verificaram, em 2018, uma queda de mais de 30% em seus orçamentos frente ao montante executado em 2014 (DE NEGRI, 2018).

Juntamente ao CNPq, a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), outra agência de fomento à pesquisa no Brasil, tem também experimentado um aumento da inconsistência orçamentária nos últimos anos. A esta última foi estabelecido um limite de destinação de recursos de R\$ 3,07 bilhões em 2020, valor 26,6% abaixo dos R\$ 4,18 bilhões registrados em 2019 e 56,2% inferior aos R\$ 7,01 bilhões de 2015 (VIEIRA; OURIQUES; AREND, 2020). O CNPq, por sua vez, apresenta uma tendência bastante similar, tendo o valor do orçamento executado em 2014, de R\$ 2,78 bilhões, caído em mais da metade até 2020, quando atingiu um valor previsto de R\$ 1,29 bilhão, tendo registrado R\$ 1,44 bilhão em 2018; apesar de não terem se concretizado, propostas de fusão entre as duas agências foram cogitadas (VIEIRA; OURIQUES; AREND, 2020).

São verificadas, contudo, iniciativas já em andamento no que diz respeito ao desenvolvimento da Indústria 4.0 no Brasil. A mais proeminente delas está vinculada à Confederação Nacional da Indústria (CNI), a partir da criação, em 2018, do Programa SENAI 4.0 em âmbito do Sistema Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI), fruto do amadurecimento de uma série de outros projetos coordenados pela instituição que visam promover a transição da indústria brasileira para o novo paradigma industrial (SILVA, 2020). O referido programa atua de forma conjunta aos Institutos SENAI de Inovação, rede criada em 2013 e voltada à promoção da integração entre academia e empresas a partir da pesquisa científica aplicada a projetos de desenvolvimento de produtos e soluções empresariais customizadas (SILVA, 2020). Atualmente, a rede conta com 26 institutos ao longo do território nacional em que mais de 930 pesquisadores conduzem em torno de 1.300 projetos (SENAI, 2022). As fases de atuação do Programa SENAI 4.0 com relação ao suporte às empresas englobam desde o diagnóstico da situação atual frente à adoção das tecnologias e conceitos 4.0, passando pela estruturação de um plano de ação, até o fornecimento de acesso a ambientes de teste em âmbito dos Institutos SENAI de Inovação. Além disso, o programa conta também com cursos de nível médio, técnico e de pós-graduação dedicados ao tema Indústria 4.0 (SILVA, 2020).

A infraestrutura atual do país, por sua vez, ainda não possibilita a conexão e o estabelecimento de processos de cocriação de soluções e produtos entre os agentes a partir de plataformas de internet industrial ou redes de *testbeds*⁹, conforme verificado nos casos de Alemanha e China. Segundo o Índice Global de Inovação de 2021, composto a partir da coleta e avaliação de dados relativos ao ambiente e à infraestrutura de suporte à inovação em mais de 132 países, a economia brasileira é classificada como a 57^a mais inovadora na colocação geral, a frente apenas da África do Sul em se tratando do grupo BRICS e atrás de grande parte das economias emergentes como México, Chile, Tailândia e Turquia (WIPO, 2021). Com relação ao índice de infraestrutura de dados divulgado pelo Banco Mundial, o Brasil apresentou um crescimento de 20 pontos entre o resultado atingido em 2016, de 55 pontos, e o dado mais recente, de 75 em 2019 (WORLD BANK, 2022d).

Ademais, a inexistência de um planejamento nacional de longo prazo com relação à infraestrutura de P&D afeta diretamente o avanço da Indústria 4.0 no país. Em primeiro lugar, não existem mecanismos consultivos consolidados para que se compreenda com profundidade as necessidades dos projetos em andamento ou mesmo o entendimento da comunidade

⁹ Plataformas de experimentação utilizadas para testar a aplicação de produtos e outras soluções em condições que simulam o mundo real, podendo ocorrer de forma colaborativa entre os agentes envolvidos (IEDI, 2018).

científica a respeito (DE NEGRI, 2018). O financiamento à infraestrutura, por sua vez, conta com um único instrumento principal cujos recursos se voltam à ampliação da estrutura de pesquisa em âmbito nacional, qual seja, o fundo setorial CT-Infra. Devido, contudo, à mencionada falta de um objetivo claro para o setor de P&D no Brasil, o baixo volume de recursos dos quais dispõe acaba sendo pulverizado entre as universidades brasileiras, que por sua vez destinam a parcela que lhes é cabida entre seus departamentos com vistas à sustentação ou então à criação de novos pequenos laboratórios, corroborando para a manutenção de uma infraestrutura de pesquisa enxuta e descentralizada (DE NEGRI, 2018).

Um estudo conjunto conduzido pelo Instituto de Pesquisas Econômicas Aplicadas (IPEA), CNPq e MCTI, realizado com 1.760 unidades de pesquisa e laboratórios espalhados pelo país, procurou mensurar o cenário descrito anteriormente. Destes, apenas 88 possuem patrimônio avaliado em mais de R\$ 5 milhões em termos de equipamentos, enquanto uma parcela de 60% dos estabelecimentos não atingia o valor de R\$ 500 mil, considerando-se, além dos equipamentos, também as edificações (DE NEGRI, 2018). Ainda, a avaliação do número de pesquisadores envolvidos com as instituições consideradas corrobora ainda mais a conclusão de baixa escala da estrutura de P&D nacional: ao todo, foi apurado um total de aproximadamente 8.000 pesquisadores, o que aponta para uma equipe composta por 4 pesquisadores, em média, em cada unidade (DE NEGRI, 2018).

A articulação de um sistema de crédito voltado ao financiamento de projetos que busquem desenvolver a Indústria 4.0 no país ainda é bastante incipiente. Com relação ao mercado de capitais privado, tal estágio é praticamente inexistente em termos de investimentos relevantes. O mercado de *venture capital*, modalidade de financiamento que apresenta mecanismos capazes de fazer frente ao elevado risco envolvido em projetos de inovação e P&D conforme apontam experiências internacionais, encontra-se em estágio bastante incipiente no Brasil. Em 2013, a participação dos investimentos dessa modalidade no PIB nacional foi de 0,01%, menor em comparação ao verificado em 2014 na África do Sul, de 0,1% (DE NEGRI, 2018). Em 2015, economias mais desenvolvidas como Alemanha, EUA e Israel apresentaram uma participação de, respectivamente, 0,03%, 0,33% e 0,38% (DE NEGRI, 2018).

De 2014 a 2019, estima-se que o Brasil tenha investido a cifra de US\$ 3,5 bilhões em tecnologias da nova geração industrial, montante consideravelmente baixo frente aos quatro primeiros colocados: EUA, com US\$ 496 bilhões; China, com US\$ 369 bilhões; Japão, com US\$ 194,9 bilhões; e Alemanha, com US\$ 36 (RODRIGUES et al., 2021). As iniciativas mais representativas a esse respeito se encontram, mais uma vez, lideradas pela CNI na figura do

SENAI, que anunciou em agosto de 2022 o direcionamento de recursos na ordem de R\$ 16,5 milhões para a instalação de 30 laboratórios de aplicação no estado de Santa Catarina, dos quais 16 estarão em operação até o final do mesmo ano (FIESC, 2022). Ainda, em setembro de 2022, foi lançado pelo SENAI um edital de R\$ 10 milhões visando o fomento a projetos de micro, pequenas e médias empresas voltados à Indústria 4.0. A iniciativa, feita em parceria com o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), a Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI) e o Ministério da Economia, estabelece a destinação de até R\$ 800 mil para cada projeto selecionado (INVESTSP, 2022).

No que tange às *indústrias relacionadas e de apoio*, a indústria brasileira de semicondutores não apresenta representatividade a nível mundial, além de ser capaz de atender apenas a uma parcela pequena da demanda interna. Os mais de 200 milhões de *chips* produzidos anualmente representam em torno de 9% do total utilizado pelas empresas locais, tendo o faturamento do setor em 2021 atingido R\$ 4,5 bilhões (ABISEMI, 2022). Ademais, a indústria de semicondutores brasileira acumula investimentos de US\$ 2,5 bilhões em infraestrutura, máquinas e equipamentos, tendo sido destinados R\$ 830 milhões a projetos de P&D (ABISEMI, 2022). O setor é composto por aproximadamente 42 agentes distribuídos nos estados de São Paulo, Rio Grande do Sul, Pernambuco, Minas Gerais, Espírito Santo, Amazonas, Paraná, Bahia e Santa Catarina, apresentando modelos de negócios e naturezas jurídicas variadas, conforme Filippin (2020):

[...] oito são empresas integradas ou empresas *fabless with manufacturing capabilities*¹⁰; quatro são empresas *fabless*¹¹; 15 atuam apenas na etapa de *back-end*¹²; 12 são DHs¹³; duas são prestadoras de serviços; e uma integra a cadeia de EDA¹⁴. [...] há uma empresa pública, trinta empresas privadas, três instituições públicas e sete instituições privadas sem fins lucrativos (FILIPPIN, 2020, p. 312).

Contudo, existem entraves relevantes ao desenvolvimento da indústria de semicondutores do país. Tais aspectos estão relacionados especialmente à estrutura produtiva nacional e a *condições de fatores* desfavoráveis: i) em primeiro lugar, a baixa participação de produtos de alto valor agregado na pauta de exportação do país faz com que a demanda

¹⁰ Empresas que dominam todas as etapas de produção de determinados módulos de componentes semicondutores, terceirizando a fabricação de outros necessários à composição do produto final, geralmente *wafers* (FILIPPIN, 2020).

¹¹ Empresas focadas na realização de etapas da cadeia de valor que não envolvem a produção dos componentes, quais sejam, a concepção do produto, o projeto e a prestação de serviço ao cliente (FILIPPIN, 2020).

¹² Etapa final de integração dos componentes que resulta no produto final, posterior à produção (FILIPPIN, 2020).

¹³ *Design house*, empresas responsáveis pela execução de projetos de *design* de componentes (FILIPPIN, 2020).

¹⁴ *Electronic design automation*, ferramentas de *software* voltadas à concepção e testagem de modelos de sistemas eletrônicos complexos (EDAC, 2022).

nacional seja relativamente baixa em comparação aos mercados da Ásia, Europa e EUA, desestimulando investimentos de empresas estrangeiras; ii) a disponibilidade de recursos financeiros voltados à ampliação da capacidade produtiva é baixa em relação aos investimentos necessários para obtenção de escala no setor, especialmente pela inexistência de empresas nacionais internacionalmente competitivas; iii) incertezas com relação à capacidade de fornecimento de grandes volumes de água ultrapura, necessária ao processo de lavagem que ocorre ao longo da produção dos *wafers*; iv) por fim, embora tenham sido vistos avanços nos últimos anos, ainda figura um cenário de escassez de mão de obra capacitada para conduzir os processos da indústria (FILIPPIN, 2020; SILVA, 2022).

O setor brasileiro de *software*, por outro lado, apresenta um dinamismo maior, muito devido aos custos de capital bastante reduzidos frente ao setor de produção de semicondutores. Considerando-se o agregado de investimentos realizados no setor de tecnologia da informação (*software*, *hardware* e serviços relacionados) em 2021, o Brasil apresentou desempenho promissor, conforme verificado na Tabela 2. A distribuição do montante de US\$ 45,7 bilhões se deu em: US\$ 26,3 bilhões para o segmento de *hardware*, 57,7% do total; US\$ 11,3 bilhões para o segmento de *software*, 24,7% do total; US\$ 8,1 bilhões para o segmento de serviços, 17,7% do total (SUKARIE NETO, 2021). Dessa forma, o Brasil avança em termos da maturidade do setor de tecnologia da informação, em que o segmento de *software* tende a representar mais de 26% – média mundial – do total de investimentos no setor, como verificado nos casos de Alemanha e EUA, estando à frente de países como Coreia do Sul, Rússia e mesmo China nesse processo (SUKARIE NETO, 2021).

Tabela 2: Investimentos mundiais em tecnologia da informação em 2021.

País	Valor Investido (US\$ bilhões)
EUA	1.065
China	333
Japão	161
Reino Unido	132
Alemanha	124
França	88
Índia	72
Canadá	57
Austrália	46
Brasil	45,7

Elaborado pelo autor com base em Sukarie Neto (2021, p. 4).

Outra característica do setor de *software* do país é a grande participação de micro e pequenas empresas. Do total de 29 mil empresas em 2021, 95% se referiam a companhias dessas duas categorias, enquanto médias empresas representaram 4,3% e grandes, 0,7%. Em termos de faturamento, a indústria de transformação é tida como o terceiro principal demandante de *softwares* no Brasil, atrás apenas dos setores financeiro e de serviços e telecomunicações (SUKARIE NETO, 2021). Tal fato, apesar de caracterizar o movimento verificado no setor industrial brasileiro de transição para a Indústria 3.0, apresenta-se como uma via interessante a ser explorada para intensificar o processo de transição para o paradigma 4.0. Outrossim, os principais entraves a essa aceleração do processo de maturação industrial, no que diz respeito ao segmento de *software*, dizem respeito à padronização e à compatibilidade entre os sistemas desenvolvidos pelas empresas. Dado o reduzido número de grandes empresas e, novamente, a inexistência de companhias consolidadas de competitividade internacional, o papel do governo no estabelecimento de padrões mínimos de parâmetros de compartilhamento e proteção de informações seria a alternativa mais viável (PACCHINI et al., 2020).

Por fim, o aspecto de *estratégia, estrutura e rivalidade das empresas*, com relação à difusão das tecnologias dentre PMEs necessita, juntamente a maiores incentivos à aplicação de medidas práticas de adoção das novas tecnologias, investimentos na disseminação de informações a respeito do tema Indústria 4.0. De acordo com estudo realizado pela CNI (2022), das 607 médias empresas consideradas, 64% indicaram a utilização de uma entre 18 tecnologias digitais listadas que caracterizam o novo paradigma industrial, enquanto o percentual para as 684 pequenas empresas foi de 42%. Ao se considerar todo o grupo amostral (mais 400 empresas de grande porte, para além das outras 1.291 empresas entre pequenas e médias), verifica-se a adoção de mais de 10 tecnologias por apenas 7% das empresas, o que denota o grau de incipiência do processo mesmo em se considerando empresas maiores (CNI, 2022). O benefício mais esperado a partir da digitalização segue sendo o aumento da produtividade, evidenciando que a integração total da cadeia produtiva, conceito fundamental da Indústria 4.0, consiste em um objetivo de médio a longo prazo para as grandes companhias e um assunto muito distante da realidade de pequenas e médias empresas (CNI, 2022; PACCHINI et al., 2020).

4.2 ALTERNATIVAS À INSERÇÃO COMPETITIVA DO BRASIL NO NOVO PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL

Frente à análise do atual contexto brasileiro quanto ao desenvolvimento da Indústria 4.0, bem como das experiências em curso de dois dos principais países promotores de iniciativas com esse fim, cabe agora elencar algumas conclusões práticas que sirvam como diretrizes de atuação do governo brasileiro a partir de uma necessária política industrial. Vale ressaltar que não faz parte do escopo do presente trabalho definir iniciativas para endereçar os principais pontos levantados, mas sim elencar a priorização de atuação do governo sobre cada variável avaliada, quais sejam, o próprio *governo*, as *condições dos fatores*, as *indústrias relacionadas e de apoio* e a *estratégia, estrutura e rivalidade das empresas*.

O primeiro a ser discutido é o papel do *governo*. A importância do estabelecimento de um plano nacional delimitado, que disponha de mecanismos acurados de acompanhamento e com canais de fomento bem articulados, não se dá apenas sobre o tema Indústria 4.0, mas é imprescindível para que este ocorra de forma a garantir ao país uma posição internacional competitiva (IEDI, 2022b). Isso se deve ao fato de que, apesar de ser um dos principais vetores da competitividade, as atividades de promoção de inovações são também as que envolvem o maior risco: na prática, recursos são empregados na criação de soluções, cuja previsão de aderência no futuro se dá com base em poucos indícios coletados a partir de experiências similares, raramente compatíveis em sua totalidade (KUO; SHYU; DING, 2019). Ademais, o processo de desenvolvimento não se dá sobre um ambiente estático, fazendo com que a repentina alteração das premissas consideradas no início do projeto invalide todo o avanço verificado. Dessa forma, o principal papel do governo está em reduzir os riscos envolvidos, seja arcando diretamente com os custos do progresso tecnológico, seja controlando o grau de mutação do ambiente econômico/regulatório com vistas à elevação de sua previsibilidade. Exemplos dessa última forma de atuação são as iniciativas de China e Alemanha na promoção de plataformas digitais de cocriação amplamente difundidas, que elevam o nível de compatibilidade dos novos produtos e serviços criados.

Ademais, a constituição de um plano nacional coeso é importante também para promover o direcionamento coerente dos recursos tanto públicos quanto privados, garantindo a continuidade do processo de desenvolvimento da Indústria 4.0 nacional (VIEIRA; OURIQUES; AREND, 2020). A condução dispersa e fragmentada de iniciativas dessa natureza a partir de agentes como instituições públicas, entidades empresariais, academia e

agências de fomento aumenta as chances de obtenção de resultados conflitantes entre si. Dessa forma, dados os pontos elencados, atribui-se a essa variável um nível de **prioridade 1**.

As *condições dos fatores* se configuram enquanto o aspecto mais defasado dentre os três restantes, principalmente devido ao baixo grau de especialização da mão de obra nacional para a Indústria 4.0. Dado o posicionamento do processo de transição da estrutura produtiva na fronteira do progresso técnico, é essencial a consolidação de um corpo robusto de recursos humanos aptos a expandi-la e a operacionalizar os frutos advindos dessa evolução na economia (IEDI, 2022b). Os centros de P&D mostram-se ainda insuficientemente difundidos e pouco articulados às empresas, bem como as condições de financiamento que, além de se apresentarem bastante difusas em seus objetivos, têm verificado diminuição de recursos disponíveis nos últimos anos (VIEIRA; OURIQUES; AREND, 2020). Dentre os indicadores parciais elencados para avaliar as *condições dos fatores*, a infraestrutura 4.0 é a que se apresenta em melhor estágio de maturação: em relação ao índice de infraestrutura de dados divulgado pelo Banco Mundial, o país apresenta desempenho melhor do que a China, por exemplo.

As *condições dos fatores*, contudo, apresentam características que as tornam especialmente relevantes para a consolidação de vantagens competitivas na Indústria 4.0. São elas: i) a capacidade de condicionar o ritmo do avanço das demais variáveis de forma mais proeminente do que o efeito contrário – vide a virtual inviabilização do progresso das *indústrias relacionadas e de apoio* no país, especialmente o setor de semicondutores, em função da escassez de mão de obra especializada; ii) um impacto mais amplo dentre as variáveis principais – melhorias em termos de mão de obra, centros de P&D, financiamento e infraestrutura beneficiam, direta ou indiretamente, todos os agentes da cadeia de valor. Destarte, tendo em vista ambos os apontamentos e os desafios que se colocam para aperfeiçoar os fatores de produção brasileiros, atribui-se a essa variável um nível de **prioridade 1**.

Para as *indústrias relacionadas e de apoio*, vislumbra-se um cenário diferente. De um lado, percebe-se a constituição de uma indústria de semicondutores caracterizada pelo baixo acúmulo de capital e pela limitação imposta a partir das *condições dos fatores*, especialmente falta de mão de obra especializada e falta de recursos de financiamento, sejam eles públicos ou privados, compatíveis com as necessidades – extremamente altas – de investimentos para a expansão da produção (FILIPPIN, 2020; SILVA, 2022; ZVEI, 2021). De outro, há uma indústria de *software* que, apesar das mesmas limitações de fatores de produção, utiliza-se da tendência a zero dos custos marginais de suas empresas para gerar excedentes que podem ser

reinvestidos (SCHWAB, 2016). Dada essa realidade bastante condicionada, atribui-se a essa variável um nível de **prioridade 2**, além do seguinte adendo: faz sentido condicionar o progresso especialmente do setor de semicondutores a uma política de atração de investimentos estrangeiros lastreada na progressão da qualidade dos fatores de produção, tratados como prioridade 1.

A difusão do novo paradigma industrial sobre as PMEs brasileiras é incipiente. A maior parcela das empresas ainda não adotou qualquer uma das novas tecnologias, sendo que a maioria daquelas que as possuem contam com um a três desses recursos técnicos (CNI, 2022). Tal fato demonstra a baixa adesão dessas empresas ao conceito fundamental de interconectividade tecnológica, característico do aspecto revolucionário da Indústria 4.0 abordado no capítulo 1, e o foco das empresas brasileiras no ganho de produtividade dos processos vigentes (CNI, 2022). A baixa participação das PMEs no processo de transição do paradigma industrial, contudo, é verificada – ainda que por motivos distintos – mesmo em países em estágios mais avançados de adoção da Indústria 4.0, como Alemanha e China, o que aponta para o baixo retorno relativo de ações voltadas a esse fim. Ademais, de forma similar às *indústrias relacionadas e de apoio*, a *estratégia, estrutura e rivalidade das empresas* avaliada sob a ótica das PMEs é bastante influenciada pelas *condições dos fatores* pelos motivos elencados anteriormente. Sendo assim, atribui-se a essa variável um nível de **prioridade 2**.

Tabela 3: Resumo das prioridades de atuação de uma eventual política industrial brasileira.

Fator de criação de vantagens competitivas	Nível de prioridade
Governo	1
Condições dos fatores de produção	1
Indústrias relacionadas e de apoio	2
Estratégia, estrutura e rivalidade das empresas	2

Fonte: elaborado pelo autor.

4.3 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

Frente ao problema central do trabalho, este capítulo analisou elementos da competitividade da Indústria 4.0 no Brasil com base no instrumento teórico proposto no capítulo anterior. A partir disso, a comparação dos resultados da análise do caso brasileiro aos

resultados obtidos por meio da avaliação das experiências internacionais de Alemanha e China elucidam tanto iniciativas bem-sucedidas nestes dois últimos países, que poderiam ser adotadas pelo governo brasileiro a partir de uma nova política industrial, quanto quais vantagens competitivas para a Indústria 4.0 já se encontram consolidadas em outros países, sendo pouco provável que o Brasil consiga superá-las ou mesmo equipará-las. Dessa forma, são identificadas, com base na experiência internacional, as prioridades de atuação capazes de tornar uma eventual nova política industrial brasileira potencialmente apta a endogeneizar a dinâmica da Quarta Revolução Industrial, alcançando-se assim o objetivo geral proposto pelo presente trabalho. Ademais, são alcançados os seguintes objetivos específicos: avaliar vantagens competitivas do Brasil em termos da Indústria 4.0; e identificar medidas concretas que poderiam ser tomadas pelo Brasil para impulsionar a transição paradigmática da indústria nacional.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho abordou a Indústria 4.0 enquanto fenômeno, discutindo suas principais características, as alterações promovidas sobre o capital produtivo e seus impactos sobre a atividade econômica e o trabalho. Também foi trazida uma discussão a respeito das abordagens teóricas sobre a competitividade nacional para que se pudesse elencar o modelo do *Diamante Competitivo* de Porter como instrumento teórico capaz de avaliar o ambiente econômico interno de dois dos países com iniciativas mais avançadas em termos de promoção da Indústria 4.0: Alemanha e China. Aqui, buscou-se identificar quais são os principais fatores responsáveis por fazer com que os novos setores industriais apresentem maior grau de desenvolvimento em alguns países do que em outros, a partir da criação de vantagens competitivas.

Posteriormente, a mesma análise foi feita sobre o ambiente econômico brasileiro para que, uma vez identificadas suas particularidades com relação à constituição de vantagens competitivas para a Indústria 4.0, fosse possível compará-lo às experiências internacionais. A partir disso, foram identificadas iniciativas bem-sucedidas que seriam passíveis de incorporação ao ambiente econômico brasileiro, através de uma política industrial e mesmo vantagens competitivas da Indústria 4.0 que já se encontram consolidadas nos outros dois países, sendo pouco provável que o Brasil consiga superá-las ou mesmo equipará-las. Finalmente, foram identificadas, com base na experiência internacional, as prioridades de atuação capazes de tornar uma eventual nova política industrial brasileira potencialmente apta a endogeneizar a dinâmica da Quarta Revolução Industrial.

Dessa forma, o presente trabalho partiu do conceito de Indústria 4.0 proposto por Carvalho e Cazarini (2020), em que se busca fazer referência a um novo modelo de fabricação capaz de estruturar a ampla integração dos recursos tecnológicos, sejam eles inéditos ou não, ao longo de toda a cadeia industrial, elevando consideravelmente seu desempenho virtual, digital e tecnológico. Frente a isso, foram discutidos os princípios estruturantes do novo paradigma industrial, quais sejam, a descentralização, a virtualização, a interoperabilidade, a modularidade, a capacidade de resposta em tempo real e a orientação a serviços (CARVALHO; CAZARINI, 2020). O estabelecimento desses princípios requer, inicialmente, um aumento das capacidades do capital produtivo, que é viabilizado a partir das tecnologias-base da Quarta Revolução Industrial. São elas: a IoT, o *Big Data*, a Computação em Nuvem, os Sistemas Ciber-Físicos, os Robôs Autônomos, a Manufatura Aditiva, a Realidade Aumentada e a IA (PACCHINI et al., 2019). Todos os recursos técnicos listados

corroboram para o atingimento da integração dos mundos físico e digital, consolidando um ambiente de amplo acesso a informações geradas em tempo real e capacitado a tomar decisões autônomas com base nestas. Ainda, são analisadas as tecnologias de interface, responsáveis por definir a disposição, a interação e o papel das tecnologias-base ao longo da cadeia produtiva, concedendo a esta o aspecto “inteligente” intrínseco à Indústria 4.0. Fazem parte desse conjunto de tecnologias a Manufatura Inteligente, o Produto Inteligente, a Cadeia de Fornecimento Inteligente e o Trabalho Inteligente (FRANK; DALENOGARE; AYALA, 2019).

Com relação aos pontos de inflexão inerentes à Indústria 4.0, são abordadas as visões que conferem ao novo paradigma industrial seu caráter revolucionário. Schwab (2016) destaca a velocidade, a amplitude e a profundidade dos impactos trazidos pelo novo arranjo produtivo, em proporções muito maiores em relação às Revoluções Industriais anteriores. Benitez, Ayala e Frank (2020) destacam a transição de uma organização industrial baseada em transações – característica de todas as revoluções industriais anteriores – para outra baseada na cocriação. A partir disso, a contribuição individual de cada agente em termos de módulos específicos de tecnologia para a constituição da cadeia de valor passa a ser gradativamente substituída pela construção conjunta de soluções tecnológicas entre esses agentes, em ecossistemas de inovação. Popkova, Ragulina e Bogoviz (2018) destacam, para além do verificado acúmulo de inovações tecnológicas e seu impacto sistêmico, outros cinco fatores de inflexão relevantes: a virtual exclusão do trabalho humano da linha de produção, o impacto da Indústria 4.0 sobre todas as áreas de negócio, a redução das externalidades negativas do processo de globalização, as novas necessidades regulatórias em torno da propriedade intelectual e a alta flexibilidade da linha de produção frente a estímulos internos e externos à indústria.

Considerações são feitas também a respeito dos impactos da Indústria 4.0 sobre o trabalho. A partir das tecnologias que caracterizam o advento da Quarta Revolução Industrial, a perspectiva é de que praticamente qualquer tarefa se torna passível de automação, sendo o grau de domínio das tecnologias sobre as habilidades necessárias para sua execução de forma satisfatória o fator determinante do limite da automação na indústria (FREY; OSBORNE, 2013). Tal fronteira tende a ser expandida em função do tempo devido ao acúmulo dos avanços tecnológicos, abrangendo atividades cada vez mais complexas. Dessa forma, a tendência que se desenha é de que as atividades que demandam maior qualificação educacional por parte dos profissionais sejam beneficiadas, dando indícios do início de um processo de sobreposição da descoberta de novas formas de poupar trabalho frente à

velocidade em que são encontradas novas aplicações para ele (FREY; OSBORNE, 2013; SCHWAB, 2016).

A partir da discussão das abordagens teóricas a respeito da competitividade dos países, definiu-se o modelo do *Diamante Competitivo* de Porter como instrumento teórico para avaliar o ambiente econômico interno dos países selecionados. De um lado, a teoria econômica ortodoxa não vê sentido na avaliação da competitividade dos países por entender que só há competição em âmbito microeconômico (entre as empresas e indústrias) (SMIT, 2010). De outro, não há um consenso na literatura em torno de um modelo definitivo para a avaliação da competitividade, seja ela relativa a países, indústrias ou empresas (VLADOS, 2019). Sendo assim, a estrutura do Diamante Competitivo se mostra apta a incorporar à análise os aspectos incipientes da Indústria 4.0 que, mesmo ainda não plenamente inseridos em uma cadeia de valor caracterizada como tal, desde já parecem afetar a competitividade nacional. Dadas as especificidades do objeto em questão, foram analisados, dentre os fatores propostos no modelo do Diamante Competitivo, as *condições dos fatores*, as *indústrias relacionadas e de apoio*, a *estratégia, estrutura e rivalidade das empresas* e o *governo*. A partir disso, foram analisados indicadores parciais para cada um dos fatores em questão: para o primeiro, o grau de especialização da mão de obra, as condições dos centros de P&D, as condições de infraestrutura e as condições de financiamento; para o segundo, a as indústrias nacionais de semicondutores e de *software*; para o terceiro, a disseminação das novas tecnologias sobre as PMEs do país; e para o quarto, iniciativas provenientes desta esfera ao longo da análise dos outros três fatores.

Dentre os três países analisados, a Alemanha é, de maneira não surpreendente, o que parece estar em estágio mais avançado de implementação da Indústria 4.0. Apesar de serem necessários ajustes, o sistema educacional alemão tem sido capaz de formar indivíduos capacitados a conduzir projetos de P&D e a articular seus resultados à realidade das empresas. Evidências disso são a grande quantidade de centros de pesquisa de desenvolvimento tecnológico voltados à Indústria 4.0 e o fato de 60,4% do total de pesquisadores do país em 2020 estarem empregados em empresas da iniciativa privada (OECD, 2022). A avançada indústria manufatureira alemã também garante vantagens competitivas ao país, contando com grandes empresas consolidadas mundialmente, que se encontram na fronteira do desenvolvimento tecnológico e que são capazes de realizar investimentos bastante expressivos por conta própria, especialmente nos setores de maquinário e *software* industriais.

O governo tem desempenhado papel importante no desenvolvimento de infraestrutura digital e no estabelecimento de padrões digitais para mitigar os riscos da transição de

paradigma produtivo, a exemplo do projeto Gaia-X. Outra frente sobre a qual o governo alemão tem se colocado enquanto principal agente diz respeito às condições de financiamento, seja por meio da contribuição com recursos próprios, seja por através da articulação institucional em âmbito da UE. Fontes de financiamento constituídas através de recursos de mercado seguem sendo pouco exploradas. Apesar de ser pouco representativa se comparada aos principais produtores, a indústria de semicondutores alemã tem verificado pesados investimentos, inclusive estrangeiros, para o desenvolvimento de novas plantas, sendo o principal objetivo a redução da dependência dos fornecedores asiáticos. O segmento de *software*, especialmente industrial, mostra-se bastante maduro e competitivo a nível internacional, colaborando para o rápido avanço da digitalização no país. As PMEs, apesar de apresentarem o maior grau de inserção na Indústria 4.0 dentre os países analisados no trabalho, seguem atrasadas em relação às demais iniciativas elencadas.

A China aparece em seguida como país que mais avançou rumo à adoção efetiva da Indústria 4.0. O sistema de educação chinês se apresenta ainda pouco eficiente na preparação da mão de obra para as atividades profissionais. Contudo, importante progresso tem sido verificado na qualificação da mão de obra a partir do retorno de pesquisadores ao país após a conclusão de seus estudos em outros países. Apesar de os centros de P&D chineses não serem ainda amplamente difundidos como no caso alemão, grandes empresas têm sido responsáveis por avanços tecnológicos importantes no que diz respeito à Indústria 4.0, tendo estas e outras empresas não diretamente controladas pelo governo sido responsáveis por empregar 58,5% do total de pesquisadores do país em 2020 (OECD, 2022).

Para as grandes empresas, esse processo tem sido possível devido aos incentivos governamentais que recebem e à grande escala que conseguem alcançar em termos de coleta e processamento de dados de usuários. Apesar de receber pesados investimentos governamentais, especialmente para o estabelecimento de plataformas de internet industrial, a infraestrutura chinesa se apresenta ainda incipiente dada a extensão de seu mercado, carecendo especialmente de empresas com expertise para o estabelecimento de interconectividade entre os componentes digitais. As condições de financiamento são sustentadas, em sua maior parte, pelo governo, tendo sido a China o país que mais investiu no desenvolvimento de tecnologias da Indústria 4.0 no período de 2014 a 2019 dentre os três analisados (RODRIGUES et al., 2021). Contudo, o governo chinês tem buscado desenvolver alternativas de financiamento de forma conjunta a instrumentos de mercado, empreendimento no qual vem obtendo sucesso. A indústria de semicondutores chinesa é uma das mais desenvolvidas do mundo, tendo apresentado as maiores taxas de crescimento da capacidade

produtiva dentre os principais fornecedores nos últimos anos (ZVEI, 2021). A indústria de *software*, especialmente industrial, contudo, não apresenta o mesmo dinamismo, sendo bastante dependente de fornecedores externos. As PMEs do país, em geral, encontram-se em situação bastante atrasada, estando por vezes em processo de transição para a Indústria 3.0 ou inseridas em ilhas digitais, que acabam por refrear seu progresso.

O Brasil, por sua vez, é, dos três, o país mais distante no processo de desenvolvimento de uma matriz nacional de Indústria 4.0. Inicialmente, chama a atenção o fato de ser o único dentre os três a não possuir um planejamento governamental que estabeleça diretrizes claras com relação à inserção do país na Quarta Revolução Industrial. O sistema educacional brasileiro se mostra bastante defasado com relação ao desenvolvimento de habilidades requeridas à mão de obra para o desenvolvimento da Indústria 4.0. A baixa difusão dos centros de P&D evidencia, para além das dificuldades enfrentadas na formação de mão de obra especializada, a grande evasão de profissionais com essas características. Outro fato que sustenta essa afirmação está relacionado à porcentagem de pesquisadores empregados por empresas, que atingiu aproximadamente 19% do total em 2020 (OECD, 2022). Apesar de não contar com iniciativas difundidas de plataformas digitais que visem a constituição de ambientes de testes e compartilhamento de informações às empresas, o Brasil apresenta uma infraestrutura de dados mais bem estruturada em relação à China, de acordo com o indicador divulgado pelo Banco Mundial. A articulação de um sistema de crédito voltado ao financiamento de projetos que busquem desenvolver a Indústria 4.0 no país ainda é bastante incipiente, sendo os principais investimentos conduzidos por instituições públicas e agências de fomento, estando a disponibilidade de recursos bastante aquém do verificado nos outros dois países.

A indústria de semicondutores no Brasil é bastante enxuta, mesmo considerando-se apenas a demanda nacional, estando a indústria de *software* mais bem posicionada em termos de desenvolvimento e capacidade de investimento. As PMEs brasileiras, por outro lado, identificam nas tecnologias digitais meios para elevar a produtividade de processos característicos da Indústria 3.0, sendo a transição para o paradigma 4.0 um assunto ainda bastante distante. Contudo, a falta de um projeto nacional que busque facilitar e incentivar esse processo parece não ter acarretado resultados nocivos que falhas de gestão poderiam criar, como ilustra o surgimento de ilhas digitais no caso chinês. Frente a isso, conclui-se que o *governo* e as *condições dos fatores* deveriam ser priorizados por uma política industrial brasileira que objetive desenvolver a Indústria 4.0 no Brasil, cabendo às *indústrias*

relacionadas e de apoio e à estratégia, estrutura e rivalidade das empresas um nível de prioridade secundário.

Com isso, o presente trabalho endereçou o problema central proposto na introdução, que indagava como devem ser definidas as prioridades de atuação de uma política industrial brasileira que objetive desenvolver a Indústria 4.0, a partir do atingimento do objetivo geral de identificar, com base na experiência internacional, as prioridades de atuação que tornem uma eventual nova política industrial brasileira potencialmente apta a endogeneizar a dinâmica da Quarta Revolução Industrial. A partir das discussões, análises e inferências elencadas ao longo dos demais capítulos e sumarizados nesta seção conclusiva, foram atingidos também os seguintes objetivos específicos: i) discutir as características da Quarta Revolução Industrial; ii) examinar as abordagens teóricas sobre a competitividade dos países; iii) analisar o modelo do Diamante Competitivo, proposto por Porter; iv) avaliar vantagens competitivas de dois dos países mais avançados em termos da Indústria 4.0; v) avaliar vantagens competitivas do Brasil em termos da Indústria 4.0; e vi) identificar medidas concretas que poderiam ser tomadas pelo Brasil para impulsionar a transição paradigmática da indústria nacional.

REFERÊNCIAS

- ABISEMI. **Setor de Semicondutores Brasileiro**. S.L.: Associação Brasileira da Indústria de Semicondutores. Disponível em: <https://www.abisemi.org.br/abisemi/setor-de-semicondutores-brasileiro>. Acesso em: 10 ago. 2022.
- ACATECH. **Annual Report 2021**. 2021. Disponível em: <https://annualreport2021.acatech.de/>. Acesso em: 20 ago. 2022.
- AGRAWAL, A.; KUMAR, P.; TYAGI, A. India Industry 4.0 and Comparisons with Germany, South Korea and the USA. **Human & Technological Resource Management (HTRM): New Insights into Revolution 4.0**, p. 133–156, nov. 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/342889301_India_Industry_40_and_Comparisons_with_Germany_South_Korea_and_the_USA. Acesso em: 08 ago. 2022.
- AHUETT-GARZA, H.; KURFESS, T. A brief discussion on the trends of habilitating technologies for Industry 4.0 and Smart manufacturing. **Manufacturing Letters**, v. 15, p. 60–63, jan. 2018.
- ALMAJALI, D. A.; MASA'DEH, R.; TARHINI, A. Antecedents of ERP systems implementation success: a study on Jordanian healthcare sector. **Journal of Enterprise Information Management**, v. 29, n. 4, p. 549–565, jul. 2016.
- ARCESATI, R. *et al.* **China's digital platform economy: assessing developments towards Industry 4.0**. Berlim: MERICS, 2020.
- BENITEZ, G. B.; AYALA, N. F.; FRANK, A. G. Industry 4.0 innovation ecosystems: An evolutionary perspective on value cocreation. **International Journal of Production Economics**, v. 228, p. 1–13, out. 2020.
- BOSCH. **Bosch opens chip factory of the future in Dresden**. 2021. Disponível em: <https://www.bosch.com/stories/bosch-chip-factory-dresden/>. Acesso em: 20 ago. 2022.
- BRYNJOLFSSON, E; MCAFEE, A. **Race against the machine: how the revolution is accelerating innovation, driving productivity, and irreversibly transforming employment and the economy**. Lexington, Mass.: Digital Frontier Press, 2011.
- CARVALHO, N. G. P.; CAZARINI, E. W. Industry 4.0 - What Is It? **Industry 4.0 - Current Status and Future Trends**, mar. 2020.
- CHUN, K. W.; KIM, H.; LEE, K. A Study on Research Trends of Technologies for Industry 4.0; 3D Printing, Artificial Intelligence, Big Data, Cloud Computing, and Internet of Things. **Lecture Notes in Electrical Engineering**, p. 397–403, nov. 2018.
- CNI. **Indústria 4.0 cinco anos depois**. Sondagem Especial 83. Brasília: Confederação Nacional da Indústria, 2022. Disponível em: <https://www.portaldaindustria.com.br/estatisticas/sondesp-83-industria-40-cinco-anos-depois/>. Acesso em: 10 ago. 2022.

DALENOGARE, L. S. *et al.* The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance. **International Journal of Production Economics**, v. 204, p. 383–394, out. 2018.

DE NEGRI, F. **Novos Caminhos para a Inovação no Brasil**. Brasília: IPEA/ Wilson Center, 2018. Disponível em: <http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/8441/1/Novos%20caminhos%20para%20a%20inova%C3%A7%C3%A3o%20no%20Brasil.pdf>. Acesso em: 24 set. 2022.

EDAC. **About the EDA Industry**. Electronic Design Automation Consortium. Disponível em: <https://web.archive.org/web/20150802073506/http://www.edac.org/industry>. Acesso em: 10 set. 2022.

FANG, K. *et al.* Assessing national renewable energy competitiveness of the G20: A revised Porter's Diamond Model. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 93, p. 719–731, out. 2018.

FIESC. **SENAI investe R\$ 16,5 milhões e avança na oferta de formação para indústria 4.0**. Disponível em: <https://fiesc.com.br/pt-br/imprensa/senai-investe-milhoes-e-avanca-na-oferta-de-formacao-para-industria-40>. Acesso em: 10 ago. 2022.

FILIPPIN, F. **Estado e desenvolvimento: a indústria de semicondutores no Brasil**. 2020. 438 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Economia – UNICAMP, Prêmio BNDES de Economia, Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/19660/1/Premio37_Mestrado.pdf. Acesso em: 10 ago. 2022.

FRANK, A. G.; DALENOGARE, L. S.; AYALA, N. F. Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies. **International Journal of Production Economics**, v. 210, n. 210, p. 15–26, abr. 2019.

FREY, C. B.; OSBORNE, M. A. The future of employment: How susceptible are jobs to computerisation? **Technological Forecasting and Social Change**, v. 114, n. 1, p. 254–280, set. 2013.

FUCHS, C. Industry 4.0: The Digital German Ideology. **tripleC: Communication, Capitalism & Critique. Open Access Journal for a Global Sustainable Information Society**, v. 16, n. 1, p. 280–289, fev. 2018.

GARTENBERG, C. **Intel is building a new €17 billion semiconductor manufacturing hub in Germany**. 2022. Disponível em: <https://www.theverge.com/2022/3/15/22978954/intel-semiconductor-manufacturing-hub-germany-fab-europe-investment>. Acesso em: 20 ago. 2022.

GEHRKE, L. *et al.* A Discussion of Qualifications and Skills in the Factory of the Future: A German and American Perspective. In: HANNOVER MESSE, 2015, Hannover. **Industry 4.0**. Düsseldorf: Vdi-Haus Düsseldorf, 2015. p. 1-25. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/279201790_A_Discussion_of_Qualifications_and_S

kills_in_the_Factory_of_the_Future_A_German_and_American_Perspective. Acesso em: 20 ago. 2022.

GERMANY TRADE AND INVEST. **Software and Cibersecurity Market in Germany**. Berlim: Kern GmbH, 2019. Disponível em: <https://www.gtai.de/en/invest/service/publications/software-and-cybersecurity-market-in-germany-64544>. Acesso em: 08 ago. 2022.

HANNAS, W. *et al.* **China's Advanced AI Research**: Monitoring China's Paths to "General" Artificial Intelligence. 2022. Disponível em: <https://cset.georgetown.edu/publication/chinas-advanced-ai-research/>. Acesso em: 08 ago. 2022.

HORST, J.; SANTIAGO, F. **What can policymakers learn from Germany's Industrie 4.0 development strategy?** Vienna: United Nations Industrial Development Organization, 2018. Disponível em: <https://www.unido.org/api/opentext/documents/download/11712839/unido-file-11712839>. Acesso em: 27 jun. 2022.

IEDI. **Políticas para o desenvolvimento da Indústria 4.0 no Brasil**. S.L.: Instituto de Estudos para o Desenvolvimento Industrial, 2018. Disponível em: https://iedi.org.br/media/site/artigos/20180710_politicas_para_o_desenvolvimento_da_industria_4_0_no_brasil.pdf. Acesso em: 10 ago. 2022.

IEDI. **A indústria em 2021: o Brasil aquém do mundo**. S.L.: Instituto de Estudos para o Desenvolvimento Industrial, 2022a. Disponível em: https://iedi.org.br/media/site/artigos/20220404_ind_2021.pdf. Acesso em: 10 ago. 2022.

IEDI. **Indústria e estratégia de desenvolvimento socioeconômico do Brasil**. S.L.: Instituto de Estudos para o Desenvolvimento Industrial, 2022b. Disponível em: https://iedi.org.br/media/site/artigos/20220624_industria_estrategia_desenvolvimento.pdf. Acesso em: 10 ago. 2022.

INVESTSP. **SENAI lança chamada para acelerar soluções da Indústria 4.0**. Disponível em: <https://www.investe.sp.gov.br/noticia/senai-lanca-chamada-para-acelerar-solucoes-da-industria-4-0/>. Acesso em: 10 ago. 2022.

JESCHKE, S. *et al.* **Industrial Internet of Things and Cyber Manufacturing Systems**. Industrial Internet of Things, p. 3–19, out. 2016.

KAGERMANN, H. *et al.* **Industrie 4.0 in a Global Context: Strategies for Cooperating with International Partners (acatech STUDY)**. Munich: Herbert Utz Verlag, 2016.

KUO, C.-C.; SHYU, J. Z.; DING, K. Industrial revitalization via industry 4.0 – A comparative policy analysis among China, Germany and the USA. **Global Transitions**, v. 1, p. 3–14, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589791819300039?via%3Dihub>. Acesso em: 20 jul. 2022.

- LAPLANTE, P. A. *Electrical engineering dictionary*. Boca Raton: CRC Press, 2000.
Disponível em:
<https://gctjaipur.files.wordpress.com/2015/08/electrical-engineering-dictionary-pa-laplantecrc.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2022.
- LI, L. China's manufacturing locus in 2025: With a comparison of "Made-in-China 2025" and "Industry 4.0". **Technological Forecasting and Social Change**, v. 135, p. 66–74, 2018.
Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040162517307254?via%3Dihub>. Acesso em: 20 ago. 2022.
- LI, L. Education supply chain in the era of Industry 4.0. **Systems Research and Behavioral Science**, p. 1–14, 2020. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/sres.2702>. Acesso em: 20 ago. 2022.
- MAGNA CAMPOS. **Tecnologia Automação Industrial: ensino e prática**. 1ª edição. Mariana: Edição do Autor, 2016. 218 p.
- MÜLLER, J. M.; VOIGT, K.-I. Sustainable Industrial Value Creation in SMEs: A Comparison between Industry 4.0 and Made in China 2025. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology**, v. 5, n. 5, p. 659–670, out. 2018. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40684-018-0056-z>. Acesso em: 20 ago. 2022.
- NATIONAL BUREAU OF STATISTICS OF CHINA. **21-9 Number of Graduates of Formal Education by Type and Level**. Disponível em:
<http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2019/indexeh.htm>. Acesso em: 20 ago. 2022a.
- NATIONAL BUREAU OF STATISTICS OF CHINA. **21-10 Statistics on Postgraduates and Students Studying Abroad**. Disponível em:
<http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2019/indexeh.htm>. Acesso em: 20 ago. 2022b.
- NICK, G. *et al.* Industry 4.0 in Germany, Austria and Hungary: interpretation, strategies and readiness models. In: IMEKO TC10 CONFERENCE, 16ª, 2019, Berlim. **Testing, Diagnostics & Inspection as a comprehensive value chain for Quality & Safety**. 2019. p. 71-76. Disponível em:
https://www.researchgate.net/publication/335834025_Industry_40_in_Germany_Austria_and_Hungary_interpretation_strategies_and_readiness_models. Acesso em: 20 ago. 2022.
- NISHIMURA, P. L. G. *et al.* Prototipagem rápida: Um comparativo entre uma tecnologia aditiva e uma subtrativa. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM DESIGN, 12., 2016, Minas Gerais. **Proceedings [...]**. Belo Horizonte: Blucher Design, 2016. p. 4481-4491. Disponível em:
https://www.researchgate.net/profile/Galdenoro-Botura-Junior/publication/311460355_PROTOTIPAGEM_RAPIDA_UM_COMPARATIVO_ENTRE_UMA_TECNOLOGIA_ADITIVA_E_UMA_SUBTRATIVA/links/584dd93008ae4bc8993311f7/PROTOTIPAGEM-RAPIDA-UM-COMPARATIVO-ENTRE-UMA-TECNOLOGIA-ADITIVA-E-UMA-SUBTRATIVA.pdf. Acesso em: 18 jul. 2022.

OECD. **Main Science and Technology Indicators**. S.L.: OECD.Stat, Organisation for Economic Co-operation and Development. Disponível em: https://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=MSTI_PUB. Acesso em: 25 ago. 2022.

ORTIZ, J. H.; MARROQUIN, W. G.; CIFUENTES, L. Z. Industry 4.0: Current Status and Future Trends. **Industry 4.0 - Current Status and Future Trends**, mar. 2020.

PACCHINI, A. P. T. *et al.* The degree of readiness for the implementation of Industry 4.0. **Computers in Industry**, v. 113, p. 1–8, dez. 2019.

PACCHINI, A. P. T. *et al.* Indústria 4.0: barreiras para implantação na indústria brasileira. **Exacta**, v. 18, n. 2, p. 278–292, abr. 2020. Disponível em: <https://periodicos.uninove.br/exacta/article/view/10605>. Acesso em: 08 ago. 2022.

PEREIRA, D. M.; SILVA, G. S. As Tecnologias de Informação e Comunicação (TICs) como aliadas para o desenvolvimento. **Cadernos de Ciências Sociais Aplicadas**, [S. l.], v. 7, n. 8, 2020. Disponível em: <https://periodicos2.uesb.br/index.php/ccsa/article/view/1935>. Acesso em: 18 ago. 2022.

PERESHYBKINA, A.; CONDE, M. E. C.; KALYESUBULA, T. **How will the industry 4.0 transformations affect SMEs in Germany by 2030?** 2017. 72 f. Hochschule Furtwangen, Furtwangen, 2017. Disponível em: https://opus.hs-furtwangen.de/frontdoor/deliver/index/docId/2467/file/Project+A_Scenario+Industry+4.0+and+SMEs_EK2.pdf. Acesso em: 20 ago. 2022.

PERFIL DA INDÚSTRIA BRASILEIRA. **Indústria Brasileira no Mundo**. Disponível em: <https://industriabrasileira.portaldaindustria.com.br/grafico/total/mundo/#!/industria-transformacao>. Acesso em: 20 ago. 2022.

POPKOVA, E. G.; RAGULINA, Y. V.; BOGOVIZ, A. V. Fundamental Differences of Transition to Industry 4.0 from Previous Industrial Revolutions. **Industry 4.0: Industrial Revolution of the 21st Century**, p. 21–29, jul. 2018.

PORTER, M. E. **The Competitive Advantage of Nations**. Nova Iorque: Free Press, 1990a.

PORTER, M. E. The Competitive Advantage of Nations. **Harvard Business Review**. Cambridge, p. 73–91, mar. - abr. 1990b. Disponível em: https://economie.ens.psl.eu/IMG/pdf/porter_1990_-_the_competitive_advantage_of_nations.pdf. Acesso em: 05 ago. 2022.

RIBAS NETO, A.; FIORIN, M. Uma Análise da Interrelação entre Indústria 4.0, Educação 4.0 e Engenharia, e suas Influências na Perspectiva de Crescimento Econômico do Brasil no Século XXI. **Caderno de Propriedade Intelectual e Transferência de Tecnologia**, v. 3, n. 1, p. 28–46, 30 jun. 2021. Disponível em: <https://publicacoes.ifc.edu.br/index.php/CPITT/article/view/2040>. Acesso em: 10 ago. 2022.

RODRIGUES, T. V. *et al.* Government initiatives 4.0: a comparison between industrial innovation policies for Industry 4.0. **Revista Gestão e Desenvolvimento**, v. 18, n. 1, p. 119–147, mar. 2021. Disponível em:

<https://periodicos.feevale.br/seer/index.php/revistagestaoedesenvolvimento/article/view/2411>. Acesso em: 10 ago. 2022.

ROSA, F.; CALVETE, C. DA S. Revolução tecnológica e reforma trabalhista: fim dos empregos no Brasil? In: CALVETE, C. DA S.; HORN, C. H. (org.). **A Quarta Revolução Industrial e a Reforma Trabalhista: impactos nas Relações de Trabalho no Brasil**. Porto Alegre: Cirkula, 2020. p. 241-259. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/fce/wp-content/uploads/2020/09/a-quarta-revolucao-industrial-e-a-reforma-trabalhista.pdf>. Acesso em: 24 set. 2022.

ROSE, J. *et al.* **A Manufacturing Strategy Built for Trade Instability**. 2020. Disponível em: <https://www.bcg.com/pt-br/publications/2020/manufacturing-strategy-built-trade-instability>. Acesso em: 20 ago. 2022.

SANTAELLA, L.; GALA, A.; POLICARPO, C.; GAZONI, R. Desvelando a Internet das Coisas. **Revista GEMInIS**, v. 4, n. 2, p. 19–32, 2013. Disponível em: <https://www.revistageminis.ufscar.br/index.php/geminis/article/view/141>. Acesso em: 18 jul. 2022.

SCHUH, G. *et al.* **Industrie 4.0 Maturity Index: Managing the Digital Transformation of Companies, Update 2020 (acatech STUDY)**. Munique: Acatech – National Academy Of Science And Engineering, 2020.

SCHUMPETER, J. A. **Capitalism, Socialism & Democracy**. Nova Iorque: Routledge, 2003. Disponível em: <http://ia802305.us.archive.org/19/items/j.-schumpeter-capitalism-socialism-and-democracy/J.%20Schumpeter%20-%20Capitalism%2C%20Socialism%20and%20Democracy.pdf>. Acesso em: 27 jun. 2022.

SCHWAB, K. **The Fourth Industrial Revolution**. Nova Iorque: Crown Business, 2016.

SENAI. **Instituto SENAI de Inovação**. Disponível em: <https://www.portaldaindustria.com.br/senai/canais/instituto-senai-de-inovacao/#conheca>. Acesso em: 10 ago. 2022.

SILVA, C. **Brasil não tem requisitos para atrair fábrica de semicondutores, dizem especialistas**. 2022. O Estado de S. Paulo. Disponível em: <https://economia.estadao.com.br/noticias/geral,brasil-requisitos-fabrica-chips-semicondutores,70004086277#:~:text=No%20Brasil%2C%20as%2020%20empresas,atra%C3%A7%C3%A3o%20de%20empresas%20do%20ramo>. Acesso em: 22 ago. 2022.

SILVA, M. P. DA. **Atuação do SENAI na formação profissional para a Indústria 4.0 no Brasil**. 2020. 52 f. TCC (Graduação) - Curso de Ciências Econômicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/216627>. Acesso em: 10 ago. 2022.

SMIT, A. J. The competitive advantage of nations: is Porter’s Diamond Framework a new theory that explains the international competitiveness of countries? **Southern African**

Business Review, v. 14, n. 1, p. 105–130, 2010. Disponível em:

<https://www.ajol.info/index.php/sabr/article/view/76358>. Acesso em: 30 jul. 2022.

SOUZA, E. M. DE M.; VIEIRA, J. DE C. Desafios da Indústria 4.0 no contexto brasileiro.

Brazilian Journal of Development, v. 6, n. 1, p. 5001–5022, 2020. Disponível em:

<https://brazilianjournals.com/ojs/index.php/BRJD/article/view/6526/5760>. Acesso em: 10 ago. 2022.

SUKARIE NETO, J. **Estudo Mercado Brasileiro de Software – Panorama e Tendências**

2022. Associação Brasileira das Empresas de Software, 2021. Disponível em:

<https://abes.com.br/dados-do-setor/>. Acesso em: 08 ago. 2022.

SUN, Y. *et al.* The transformation and upgrade of China’s manufacturing industry in Industry

4.0 era. **Systems Research and Behavioral Science**, p. 1–7, 2020. Disponível em:

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/sres.2714>. Acesso em: 20 ago. 2022.

THE DIGITAL TRANSFORMATION MONITOR. **Germany: Industrie 4.0**. European Commission, 2017. Disponível em:

https://ati.ec.europa.eu/sites/default/files/2020-06/DTM_Industrie%204.0_DE.pdf. Acesso em: 20 ago. 2022.

VAIDYA, S.; AMBAD, P.; BHOSLE, S. Industry 4.0 – A Glimpse. **Procedia**

Manufacturing, v. 20, p. 233–238, 2018.

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 (Rio de Janeiro)**, v. 19, n. 3, dez. 2020. Disponível em:

<http://www.revistaoikos.org/seer/index.php/oikos/article/viewArticle/668>. Acesso em: 10 ago. 2022.

VLADOS, C. Porter’s Diamond Approaches and the Competitiveness Web. **International**

Journal of Business Administration, v. 10, n. 5, p. 33–52, ago. 2019. Disponível em:

https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3452402. Acesso em: 08 ago. 2022.

WANG, C.-J. **China’s Semiconductor Breakthrough**. 2022. Disponível em:

<https://thediplomat.com/2022/08/chinas-semiconductor-breakthrough/#:~:text=In%202021%2C%20the%20size%20of,sufficiency%20rate%20of%2016.7%20percent..> Acesso em: 20 ago. 2022.

WEF. **Schools of the Future: defining new models of education for the Fourth Industrial Revolution**. S.L.: World Economic Forum, 2020. Disponível em:

https://www3.weforum.org/docs/WEF_Schools_of_the_Future_Report_2019.pdf. Acesso em: 10 ago. 2022.

WIPO. **Global Innovation Index 2021: tracking innovation through the Covid-19 crisis**.

S.L.: World Intellectual Property Organization, 2021. Disponível em:

https://www.wipo.int/edocs/pubdocs/en/wipo_pub_gii_2021.pdf. Acesso em: 10 ago. 2022.

WORLD BANK. **GDP, PPP (current international \$) - China, United States, Germany**.

Disponível em:

<https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.PP.CD?locations=CN-US-DE>. Acesso em: 20 ago. 2022a.

WORLD BANK. **Industry (including construction), value added (% of GDP) - China, United States, Germany**. Disponível em:

<https://data.worldbank.org/indicator/NV.IND.TOTL.ZS?locations=CN-US-DE>. Acesso em: 20 ago. 2022b.

WORLD BANK. **Labor force, total - Austria, Denmark**. Disponível em:

<https://data.worldbank.org/indicator/SL.TLF.TOTL.IN?locations=AT-DK>. Acesso em: 20 ago. 2022c.

WORLD BANK. **Statistical performance indicators (SPI): Pillar 5 data infrastructure score (scale 0-100) - Brazil**. Disponível em:

<https://data.worldbank.org/indicator/IQ.SPI.PIL5?locations=BR>. Acesso em: 20 ago. 2022d.

WORLD BANK. **Statistical performance indicators (SPI): Pillar 5 data infrastructure score (scale 0-100) - China**. Disponível em:

<https://data.worldbank.org/indicator/IQ.SPI.PIL5?locations=CN>. Acesso em: 20 ago. 2022e.

WORLD BANK. **Statistical performance indicators (SPI): Pillar 5 data infrastructure score (scale 0-100) - Germany**. Disponível em:

<https://data.worldbank.org/indicator/IQ.SPI.PIL5?locations=DE>. Acesso em: 20 ago. 2022f.

ZVEI. **Semiconductor Strategy for Germany and Europe**. Frankfurt: ZVEI, 2021.

Disponível em:

https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2021/November/Halbleiterindustrie_fuer_Deutschland_und_Europa/Semiconductor-Strategy-for-Germany-and-Europe.pdf. Acesso em: 20 ago. 2022.