UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE ECONOMIA

PEDRO CORTEZ CAMPOS

Os impactos da Indústria 4.0 na estrutura e direcionamento das cadeias globais de valor

CAMPINAS
2024

PEDRO CORTEZ CAMPOS

Os impactos da Indústria 4.0 na estrutura e direcionamento das cadeias globais de valor

Monografia apresentada ao Instituto de Economia da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Bacharel em Ciências Econômicas.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Carlos Diegues

CAMPINAS
2024

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)
Biblioteca do Instituto de Economia
Luana Araujo de Lima - CRB 8/9706

C157i

Campos, Pedro Cortez, 2001-
Os impactos da Indústria 4.0 na estrutura e direcionamento das cadeias globais de valor / Pedro Cortez Campos. – Campinas, SP : [s.n.], 2024.

Orientador(es): Antonio Carlos Diegues.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Instituto de Economia.

1. Indústria 4.0. 2. Empresas - Inovações tecnológicas. 3. Política industrial. 4. Cadeias globais de valor. 5. Inovação. I. Diegues, Antônio Carlos, 1981-. II. Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Instituto de Economia. III. Título.

Informações complementares

Título em outro idioma: The impacts of Industry 4.0 in the structure and location of global value chains
Palavras-chave em inglês:
Industry 4.0
Business enterprises - Technological innovations
Industrial policy
Global value chains
Innovation
Titulação: Bacharel em Ciências Econômicas
Banca examinadora:
Antônio Carlos Diegues [Orientador]
Célio Hiratuka
Data de entrega do trabalho definitivo: 28-11-2024

PEDRO CORTEZ CAMPOS

Os impactos da Indústria 4.0 na estrutura e direcionamento das cadeias globais de valor

Monografia apresentada ao Instituto de Economia da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Bacharel em Ciências Econômicas.

Data de aprovação: 28/11/2024

Banca Examinadora

_____

Prof. Dr. Antônio Carlos Diegues – Presidente da banca

Universidade Estadual de Campinas - Instituto de Economia

_____

Prof. Dr. Célio Hiratuka – Docente convidado

Universidade Estadual de Campinas - Instituto de Economia

DEDICATÓRIA

Eu dedico esta monografia a todos aqueles que ousam fazer ciência. O pensamento crítico é sinônimo de resistência, solidez e ousadia em um país que muitas vezes tenta desafiar o progresso.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, obrigado por dedicarem a vida a me esculpir como pessoa. Obrigado por abrirem as minhas asas, por me jogar ao mundo, por me amar incondicionalmente, por acreditar e confiar em mim. Vocês são a maior inspiração da minha vida.

À Gabi, minha irmã, obrigado por ser a minha referência acadêmica e de sucesso. Ter você como inspiração sempre moveu a minha engrenagem competitiva e me empurrou a ser uma pessoa mais dedicada e ambiciosa.

À Júlia, minha aliada de todas as horas, obrigado por ser um pilar de força e tranquilidade para mim. Você me compreende como ninguém, me acalma, me motiva, e me deixa feliz. Você é parte fundamental para o meu desenvolvimento como pessoa.

Aos meus amigos, tem sido um privilégio acompanhar o crescimento e desenvolvimento de vocês. Obrigado por muitas vezes compartilharem as mesmas dores e frustrações que eu e oferecer uma perspectiva mais alegre em meio a várias turbulências.

À Unicamp, obrigado por me abrir os olhos, por mudar a minha vida e a minha percepção do mundo. Eu me orgulho muito de ter sido estudante da Unicamp, e de todas as experiências e momentos que ela me proporcionou.

“Se toda a política precisa de uma economia, a economia determina uma política; é isso que está a acontecer (com a globalização)”

— José Saramago

RESUMO

CAMPOS, Pedro Cortez. **Os impactos da Indústria 4.0 na estrutura e direcionamento das cadeias globais de valor.** Orientador: Prof. Dr. Antônio Carlos Diegues. 2024. Monografia (Graduação em Ciências Econômicas) – Instituto de Economia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2024.

Com a ascensão da globalização produtiva, as grandes corporações transnacionais passaram a internacionalizar e fragmentar as suas estruturas produtivas, buscando em novos mercados, em geral países em desenvolvimento e emergentes, vantagens comparativas que impulsionassem a eficiência da produção e a redução de custos. A partir da década de 2010, houve a disseminação de tecnologias inovadoras que levaram à popularização do termo Quarta Revolução Industrial, um conceito que descreveria a próxima fase na evolução da indústria e da produção. Entre as tecnologias emergentes da Indústria 4.0 destacam-se a Internet das Coisas (IoT), o big data, a robótica autônoma, a manufatura aditiva e a integração horizontal e vertical de sistemas. O presente trabalho tem o objetivo de analisar os impactos da digitalização e das tecnologias da Quarta Revolução Industrial na estrutura da cadeia produtiva, mais especificamente nas decisões de geolocalização das etapas do processo de manufatura industrial, investigando se há uma tendência ao *reshoring* ou à fragmentação global. Para isso, serão analisadas políticas industriais de apoio à inovação, a modernização das cadeias globais de valor em diversos setores, a aplicabilidade das tecnologias da Indústria 4.0 e as vantagens comparativas da produção global e concentrada. Também serão analisadas políticas industriais recentes de Estados Unidos e China para a compreensão do direcionamento das grandes corporações.

Palavras-chave: Indústria 4.0; Empresas – Inovação tecnológica; Política industrial; Cadeias globais de valor; Inovação.

ABSTRACT

CAMPOS, Pedro Cortez. **The impacts of Industry 4.0 in the structure and location of global value chains.** Supervisor: Prof. Dr. Antônio Carlos Diegues. 2024. Monograph (Degree in Economic Sciences) – Instituto de Economia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2024.

With the rise of production globalization, the large multinational enterprises began to internationalize and fragment their production structures, seeking new markets, usually in developing and emerging countries, comparative advantages that would boost production efficiency and cost reduction. From the 2010s onwards, there was the spreading of innovative technologies that led to the popularization of the term Fourth Industrial Revolution, a concept that would describe the next stage in industry and production development. Among the emerging Industry 4.0 technologies, some stand out, such as the Internet of Things (IoT), big data, autonomous robotics, additive manufacturing, and horizontal and vertical system integration. The present paper has the objective of analyzing the impacts of digitalization and Industry 4.0 technologies in the production chain structure, more specifically in decisions to geolocate the stages of the industrial manufacturing process, investigating if there is a tendency to reshoring or global fragmentation. This will be done by analyzing industrial policies to support innovation, the modernization of global value chains in various sectors, the applicability of Industry 4.0 technologies and the comparative advantages of global and concentrated production. Recent industrial policies in the United States and China will also be analyzed to understand the direction of large corporations.

Keywords: Industry 4.0; Business enterprises – Technological innovations; Industrial policy; Global Value Chains; Innovation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – “Curva sorriso” da cadeia global de valor 21

Figura 2 – Organograma da colaboração público-privada na estratégia alemã da Indústria 4.0 27

Figura 3 – Evolução dos modelos de produção ao longo do tempo 32

Figura 4 – Principais riscos afetando a atratividade da Europa nos próximos três anos 46

Figura 5 - Iniciativas digitais na indústria de petróleo e gás 56

Figura 6 - Taxa de Inovação, produtividade e taxa de exportação dos principais setores no Brasil 58

Figura 7 - Impactos de oito tecnologias para a competitividade de setores produtivos 62

Figura 8 - Investimentos em tecnologias digitais no setor de petróleo e gás 63

Figura 9 - Percentual de casos de *reshoring* por país de origem (2014-2018) 66

Figura 10 - Abertura de principais regiões dos países receptores das empresas que estão sendo realocadas 67

Figura 11- Localização declarada para realocação de operações de empresas europeias em 2022 68

Figura 12 - Setores manufatureiros com mais ocorrências de casos de *reshoring* 70

Figura 13 - Principais motivações para *reshoring* 72

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – *Drivers* intrafirma para decisões de *reshoring* 39
Quadro 2 – *Drivers* extrafarma para decisões de *reshoring* 40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Investimentos em P&D (em milhões de dólares) nos principais setores da manufatura nos EUA, China e Alemanha 53
Tabela 2 - Estratégias de *reshoring* e Indústria 4.0 73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

B2B	*Business-to-Business*
B2C	*Business-to-Consumer*
C2B	*Consumer-to-Business*
CGEE	Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
CGVs	Cadeias Globais de Valor
CPS	*Cyber-Physical Systems*
E2E	*End-to-End*
ETNs	Empresas Transnacionais
GLN	*Global Lighthouse Network*
I4.0	Indústria 4.0
IDE	Investimento Direto Estrangeiro
IIoT	*Industrial Internet of Things*
IoMT	*Internet of Medical Things*
IoT	*Internet of Things*
MNEs	*Multinational Enterprises*
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
OMC	Organização Mundial do Comércio
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PEDs	Países em Desenvolvimento
TI	Tecnologia de Informação
TICs	Tecnologias da Informação e Comunicação
TO	Tecnologia de Operação
UE	União Europeia
UNESCO	*United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*
WEF	*World Economic Forum*
ZEEs	Zonas Econômicas Especiais

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO 14

1 INDÚSTRIA 4.0 E TRANSFORMAÇÕES NO PARADIGMA TECNO-ECONÔMICO 17

1.1 Antecedentes: a formação das cadeias globais de valor e a fragmentação global da produção 17

1.2 Acirramento da concorrência internacional e a transição rumo à Indústria 4.0 22

1.3 A Indústria 4.0: características, dinâmica da concorrência e heterogeneidade 29

2 *RESHORING* E IMPACTOS SETORIAIS DA INDÚSTRIA 4.0 36

2.1 Mudanças no paradigma industrial pós 2008 37

2.1.1 *Reshoring*: definição, dimensões e causas 38

2.1.2 *Nearshoring*: uma alternativa para *policymakers* 41

2.1.3 Contrapontos da relocalização industrial 43

2.2 Retorno do protecionismo e nacionalismo industrial 47

2.3 Resiliência das Cadeias Globais de Valor e excesso de dependência 48

2.4 Como as tecnologias da Indústria 4.0 impactam políticas de *reshoring* 49

2.5 Estimativas dos Impactos Setoriais da Indústria 4.0 51

2.5.1 Setores industriais com maior aderência à Indústria 4.0 52

2.5.2 Principal conjunto de tecnologias do processo de digitalização de cada setor 58

2.5.3 Aprofundamento nas dinâmicas e dados de *reshoring* 65

2.5.3.1 Análise empírica por país 65

2.5.3.2 Análise empírica por setor e impacto da Indústria 4.0 ... 69

CONCLUSÕES 74

REFERÊNCIAS 76

INTRODUÇÃO

A partir da década de 1970, com a ascensão internacional do conceito da globalização produtiva, as cadeias de produção e a divisão do trabalho foram intensamente transformadas. Por meio da fragmentação da estrutura produtiva das cadeias globais de valor, as grandes corporações internacionais passaram a dividir a produção geograficamente, buscando vantagens comparativas em países emergentes e subdesenvolvidos. Essa busca por vantagens comparativas tem como objetivo impulsionar a eficiência da produção e alcançar redução de custos. Ao expandirem suas operações para esses mercados, as corporações buscam acesso a recursos abundantes e de baixo custo, como mão de obra qualificada, matéria-prima e infraestrutura, além de aproveitar benefícios fiscais e regulatórios oferecidos por essas regiões (HIRATUKA et al., 2010).

O cenário da produção global foi intensamente transformado com o advento da Quarta Revolução Industrial ou, como popularizado por McKinsey & Company, Indústria 4.0, um conceito que se refere à próxima fase na digitalização do setor manufatureiro (BAUR e WEE, 2015). As tecnologias passaram a se tornar mais especializadas, e a tendência global de busca pela mão de obra barata entrava em um impasse: por um lado, a cadeia de suprimentos fragmentada e globalizada era, usualmente, sinônimo de redução de custos devido aos incentivos fiscais e financeiros citados, o que permitia as grandes empresas se organizar em um esquema de economias de escala e maximizar a sua produtividade e lucratividade; por outro lado, a automação da estrutura produtiva e a digitalização tornam as diferenças em salário dos funcionários menos relevante, uma vez que a quantidade alta de trabalhadores poderia ser substituída por um grupo seleto de funcionários mais qualificados, capazes de operar o maquinário de tecnologia avançada, trazendo a possibilidade da alocação da base manufatureira para países de alta renda em setores antes intensivos em trabalho (BUTOLLO, 2020).

Com o desenvolvimento das tecnologias da Indústria 4.0, mudanças nas estratégias empresariais e desenvolvimento de políticas público-privadas de incentivo à inovação, surgem motivações à tendências de relocalização de etapas manufatureiras das cadeias globais de valor, seja para os próprios países centrais (*reshoring*) ou para países adjacentes (*nearshoring*), que ainda possuem custos de produção menores e incentivos fiscais mais atrativos, mas que estejam mais próximos do mercado consumidor final, podendo usufruir dos benefícios da produção mais customizável que a Indústria 4.0 permite (GEREFFI; LEE, 2012).

Outro ponto de grande modificação e adaptação com a Quarta Revolução Industrial foi a transformação da estrutura das empresas multinacionais. O surgimento de multinacionais de

economia digital (digital MNes) implica que a grande firma está se adaptando ao avanço tecnológico. Essas firmas, como será explorado no desenvolvimento deste projeto, valorizam mais os ativos não-físicos do que os físicos, e apresentam uma preferência à manutenção de uma menor quantidade de ativos estrangeiros. Isso implica em uma menor necessidade das empresas multinacionais de economia digital de conduzir a manufatura e atividades de serviço fora de seu país base, indicando uma possível reversão das tendências de expansão global que ocorrem desde os anos 1970 (BRUN; GEREFFI; ZHAN, 2019).

Esta monografia tem o foco de estudar algumas das decorrências das tecnologias da Indústria 4.0 na evolução das cadeias globais de valor. É fato que tais tecnologias podem exercer um impacto considerável nas decisões dos gestores das empresas, e o propósito do projeto é compreender até que ponto estes impactos são vantajosos, e até que ponto eles estão sendo de fato aplicados pelas políticas industriais dos países centrais. Há um conflito entre as conclusões do senso comum dos efeitos da automação industrial na localização geográfica da matriz capitalista e as decisões das políticas industriais internacionais propriamente ditas. Como será exposto neste projeto, há benefícios e malefícios para uma descentralização da cadeia de suprimentos para os retornos econômicos e financeiros da companhia capitalista. O objetivo desta monografia é determinar de maneira objetiva quais são os fatores que determinam decisões de localização da indústria em termos da própria consolidação da matriz industrial, a fim de traçar um direcionamento de vantagens e desvantagens para diferentes setores e países, avaliando assim quais setores têm maior propensão para o *reshoring* ou *offshoring*.

As cadeias globais de valor e a estrutura da produção industrial sofreram a mais intensa e disruptiva de suas transformações com o fim do sistema monetário internacional de Bretton Woods, abertura financeira de livre circulação de capitais e a instauração da chamada globalização produtiva. Inúmeros são os estudos já realizados a respeito dos impactos da globalização na produção, da dispersão geográfica da cadeia produtiva nas economias de custo das grandes empresas transnacionais, dos ganhos de produtividade com a exploração das vantagens comparativas de países subdesenvolvidos e emergentes e até dos efeitos da evolução das tecnologias da informação e de comunicação (TICs) na tomada de decisão da grande empresa capitalista.

Entretanto, a economia da inovação é uma área de pesquisa que está em constante renovação e transformação. O tema da Indústria 4.0 é recente, uma vez que os primeiros estudos a respeito de suas aplicações e tecnologias datam dos últimos dez anos, portanto ainda é uma área a ser explorada. A relevância acadêmica da monografia é contribuir com a ciência econômica na área da inovação, destrinchando as características da Indústria 4.0, como elas

podem ser aplicadas na estrutura industrial internacional, e quais os impactos dessas aplicações nas tomadas de decisão das companhias em termos de operacionalidade da cadeia produtiva e localização geográfica das bases industriais.

O projeto ainda apresenta uma importância econômica e estratégica substancial. Uma vez compreendidos os impactos das aplicações de tecnologias de digitalização e automação provenientes da Quarta Revolução Industrial no processo produtivo, poderá se estudar os efeitos destes impactos nas decisões dos *policymakers* sobre políticas industriais de apoio à inovação das grandes potências capitalistas. Esse aprendizado será chave para as estratégias de operacionalidade da indústria e, no objetivo principal deste projeto, avaliar a que ponto é vantajoso para os gestores de grandes empresas aplicarem o *reshoring*, e a que ponto é vantajoso a manutenção das cadeias *offshore*.

O procedimento metodológico da monografia será dividido em três etapas, que condizem com a divisão de capítulos do projeto. No primeiro capítulo será feito um levantamento e análise bibliográfica a respeito da estrutura atual das cadeias globais de valor difundida com a globalização financeira dos anos 1970. Nesse mesmo capítulo, será realizada uma pesquisa a respeito da Indústria 4.0 e suas origens, suas tecnologias e possíveis aplicações na indústria.

No segundo capítulo será feita uma análise empírico-qualitativa para identificar os setores industriais mais aderentes às tecnologias da Indústria 4.0, as tecnologias em si e como elas podem impactar a cadeia produtiva de cada setor, e uma análise de casos de *reshoring* pelo mundo para mensuração dos principais países que aplicam essa política e os principais setores na qual ela ocorre. Esse estudo primeiramente contará com um levantamento de dados de relatórios de pesquisa de mercado de empresas especializadas, como McKinsey & Company, Deloitte e PwC, instituições como o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), a Confederação Nacional da Indústria (CNI), o Instituto Euvaldo Lodi (IEL), a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) e o Fórum Econômico Mundial (WEF), e pesquisas de estudo de caso como Eurofound (2019) e Ancarani e Di Mauro (2018). A análise será realizada em duas etapas: a primeira sendo qualitativa, analisando quais setores apresentam maior sensibilidade à inovação impulsionados pelas tecnologias da Indústria 4.0, e a segunda sendo quantitativa, realizando estudos de casos reais de empresas que adotaram políticas de *reshoring* e analisando o impacto de tecnologias da Indústria 4.0 nesse quesito, identificando os desafios e oportunidades específicos enfrentados por cada setor em relação à adoção das tecnologias da Indústria 4.0.

1. INDÚSTRIA 4.0 E TRANSFORMAÇÕES NO PARADIGMA TECNO-ECONÔMICO

O primeiro capítulo deste trabalho tem como objetivo pavimentar as fundações teóricas de alguns conceitos básicos para o desenvolvimento da pesquisa. Para tal, serão apresentados e desenvolvidos temas e conceitos importantes a respeito do tema a ser estudado.

O primeiro item do capítulo contempla uma análise da conjuntura econômica internacional antecedente ao recorte principal do trabalho, que é o contexto da ascensão das tecnologias da Indústria 4.0, principalmente a partir da década de 2010. Portanto, será realizada uma análise bibliográfica da literatura da globalização financeira e produtiva, desde o fim do sistema de Bretton Woods até a crise financeira de 2008. Aqui será introduzido o conceito de polos industriais de produção *offshore*, conceito essencial para estudar a possível tendência de um *reshoring* industrial.

No segundo item, será exposto o contexto internacional do acirramento da concorrência industrial pós crise de 2008, e como a dinâmica da competição capitalista levou os *policymakers* das grandes potências mundiais a moldarem suas políticas de inovação e desenvolvimento. Será exposto como o conceito da Indústria 4.0 surge em um cenário em que as potências líderes tentam empurrar a fronteira tecnológica para reorganizar a dinâmica de competição e acumulação, constituindo um novo paradigma, com o objetivo de reduzir a competitividade da eminente ameaça do desenvolvimento chinês, e reforçar suas lideranças na indústria em termos globais.

No terceiro e último item deste primeiro capítulo, será apresentado o conceito de Indústria 4.0 propriamente dito, identificando as tecnologias nela contidas e como a cadeia de suprimentos pode aplicá-las, digitalizando e automatizando diversas etapas da rede produtiva. Esta seção também explora a heterogeneidade entre diferentes setores e dinâmicas de produção no que diz respeito à geração de valor.

1.1 Antecedentes: a formação das cadeias globais de valor e a fragmentação global da produção

A segunda metade do século XX testemunhou transformações profundas no cenário econômico mundial impulsionadas por combinação de fatores históricos, comerciais e de tecnologia. O fim do sistema de Bretton Woods, na década de 1970, promoveu um impacto significativo na liberalização econômica e na abertura de mercados em escala global. O fim de Bretton Woods coincidiu com um movimento mais amplo em direção à desregulamentação

financeira em muitos países. Isso envolveu a remoção de restrições sobre transações financeiras e a flexibilização das regulamentações bancárias. A desregulamentação contribuiu para a expansão dos mercados financeiros e facilitou a mobilidade de capital entre fronteiras. A integração econômica impulsionou o comércio internacional de bens e serviços, aumentando a necessidade de transações financeiras globais. A globalização financeira a partir da década de 1970 também contou com o desenvolvimento de novos instrumentos financeiros, como derivativos e outros produtos complexos, o que proporcionou novas formas de gestão de riscos e oportunidades de investimento, estimulando a atividade nos mercados financeiros internacionais.

Esse cenário de transformações econômicas permitiu a ascensão em escala global dos mercados de capitais internacionais. Estes mercados desempenharam um papel importante na interconexão econômica global, facilitando o comércio de capitais em uma escala macroeconômica. Nas palavras de Obstfeld e Taylor (2004):

> Em um mundo com duas economias, por exemplo, uma mudança pura nos termos de troca redistribui a renda mundial longe do país cujas exportações se desvalorizam e, em igual medida, em direção ao seu parceiro comercial. No entanto, se os países trocam participações acionárias nas indústrias uns dos outros, o efeito redistributivo das flutuações nos termos de troca é amenizado. Ambos os países se beneficiam da troca porque ambos podem desfrutar de fluxos de consumo menos variáveis após o comércio (OBSTFELD & TAYLOR, 2004, p. 6, tradução nossa[1]).

A ascensão destes mercados e a liberalização econômica permitiu às empresas a realização da arbitragem de custos de capital, aproveitando as diferenças nas taxas de juros e condições de empréstimo entre diferentes regiões, criando uma pressão por eficiência financeira e promovendo o acirramento da concorrência na esfera produtiva. A transformação da produção a partir da década de 1970 teria impactos importantes na dinâmica do comércio internacional e das relações de neo-imperialismo econômico. Segundo Chesnais (1996, p. 211): "A liberalização, com a desregulamentação que a protege e acentua seus efeitos, devolveram ao capital uma liberdade de escolha quase total, no momento em que as novas tecnologias ampliam as opções como em nenhuma época anterior da história do capitalismo".

A globalização produtiva fundamentou suas bases no desenvolvimento de tecnologias no mercado financeiro e no setor de informação e comunicação, tal como em uma mudança nas estratégias empresariais das corporações multinacionais (PINTO; FIANI; CORRÊA, 2017).

---

[1] No original: "*In a world of two economies, for example, a pure terms-of-trade change redistributes world income away from the country whose exports cheapen and, in equal measure, toward its trading partner. If the countries exchange equity shares in each other's industries, however, the redistributive effect of terms-of-trade fluctuations is dampened. Both countries benefit from the exchange because both can enjoy consumption streams that are less variable after trade.*"

Com o acirramento da concorrência internacional, as empresas transnacionais (ETNs) passaram a reorganizar a sua estrutura de atividades e aumentar o seu grau de internacionalização. Isso se deu por meio da intensificação de fluxos de investimento direto estrangeiro (IDE), principalmente na categoria de fusões e aquisições de outras empresas. Dessa maneira, apresentaram uma mudança fundamentalmente estrutural na sua política empresarial. Atividades que antes eram verticalmente integradas passaram a ser externalizadas, estabelecendo redes de produção geograficamente fragmentadas (HIRATUKA et al., 2010).

> Este padrão assinalou uma nova divisão na organização industrial em escala global: a transição de ETNs organizadas hierarquicamente, com seu foco tradicional em gerenciar investimentos estrangeiros internamente, para ETNs como firmas líderes internacionais. Essas firmas trabalham com e integram seus parceiros estratégicos geograficamente dispersos, fornecedores especializados e bases de clientes em estruturas complexas, denominadas de [...] cadeias globais de valor (CGVs) (KANO; TSANG; YEUNG, 2020, p. 578, tradução nossa[2])

A expansão das cadeias globais de valor (CGVs), além de contar com o progresso tecnológico, novas formas de concorrência e mudanças nas estratégias empresariais de organização das atividades internacionais, contou também com a abertura comercial a partir da década de 1980. No plano internacional, a criação da Organização Mundial do Comércio (OMC) teve como resultado a redução das barreiras tarifárias e a ampliação de acordos de livre comércio (HIRATUKA et al., 2010). Tal abertura dos mercados proporciona um acirramento da concorrência internacional que, além da expansão global da cadeia produtiva, promove um modo de produção baseado na busca pela elevação da produtividade e pela redução dos custos (PINTO; FIANI; CORRÊA, 2017).

Em termos de estrutura geográfica da cadeia produtiva, um padrão claro de atividade internacional emerge, no qual polos industriais de produção *offshore*[3] são instalados em países em desenvolvimento (PEDs), de mão de obra barata, e que são ligados às firmas líderes e ETNs dos principais mercados consumidores da América do Norte e Europa (KANO; TSANG; YEUNG, 2020). Dessa dinâmica concretiza-se a emergência do Leste e Sudeste Asiáticos, em especial a China, como regiões que mais se beneficiaram desta nova organização internacional de produção em rede, destacando-se como grandes centros mundiais de produção de manufaturados (SARTI; HIRATUKA, 2010; STURGEON, 2002). A globalização produtiva

---

[2] No original: "*This pattern signals a new divide in industrial organization on a worldwide scale: a transition from hierarchically organized MNEs, with their traditional focus on managing internalized overseas investments, to MNEs as international lead firms. These firms work with and integrate their geographically dispersed strategic partners, specialized suppliers, and customer bases into complex structures, referred to as [...] global value chains (GVCs).*"

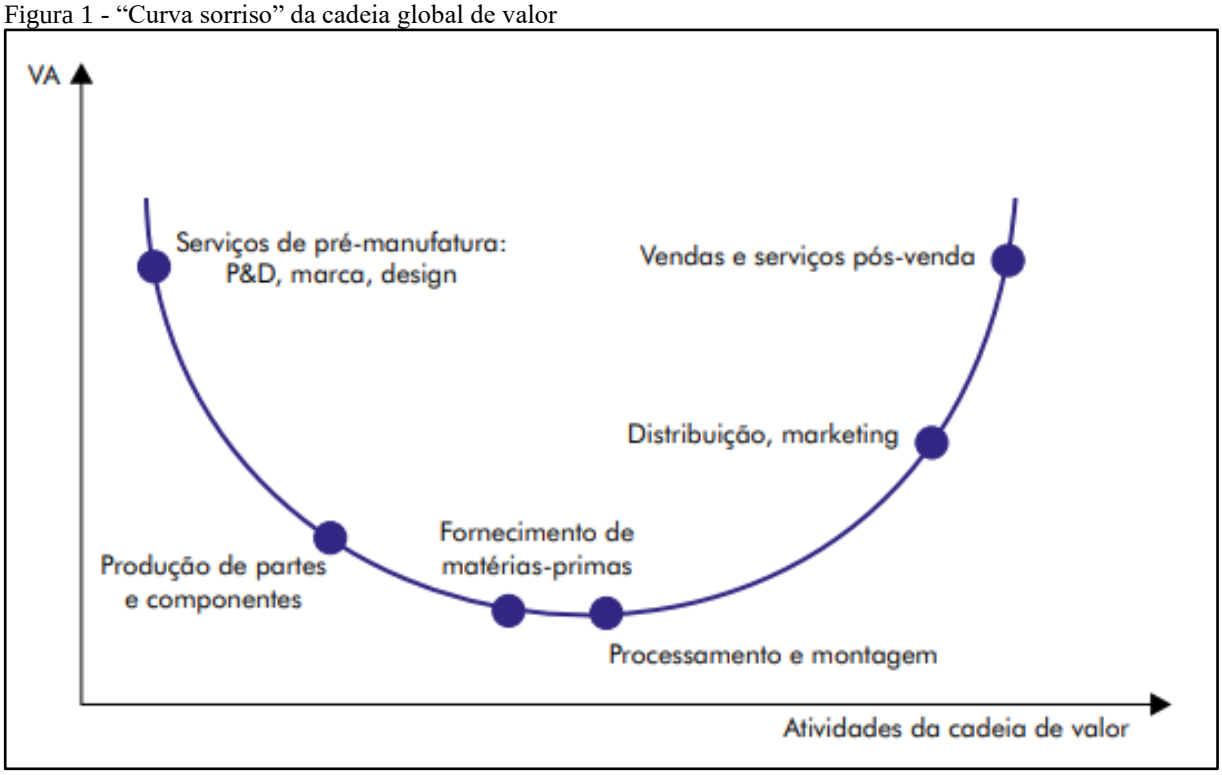
[3] Áreas ou regiões onde empresas estabelecem operações industriais em países estrangeiros, muitas vezes em busca de vantagens competitivas, como custos mais baixos, mão de obra barata e condições regulatórias favoráveis.

evoluiu com o passar das décadas e com a especialização das cadeias produtivas, até um estágio em que as CGVs se organizam de um modo em que a produção de bens finais depende da produção de bens intermediários, produzidos em diferentes países, por diferentes empresas especializadas, todas ligadas a uma matriz principal em um país central (WHITTAKER et al., 2010).

> Dessa forma, o processo de produção passou a ocorrer sob forma de uma rede internacional integrando diferentes países e diferentes empresas, realizando etapas da cadeia de valor sob a coordenação das grandes corporações, que gerenciam suas próprias filiais e as demais empresas da rede com o objetivo de obter o máximo de retorno para o conjunto das suas atividades (SARTI; HIRATUKA, 2010, p. 9).

A estrutura das CGVs intensificou a concorrência entre as grandes corporações mundiais no nível das etapas produtivas, provocando uma transformação da divisão internacional do trabalho. O padrão de inserção das economias periféricas na cadeia produtiva adaptou-se à dinâmica da concorrência internacional, uma vez que as grandes companhias internacionais passaram a, indiretamente, coordenar o comércio e a dispersão geográfica, utilizando das especializações e vantagens comparativas que cada polo *offshore* poderia proporcionar. Isso implica em transformações estruturais nos padrões de produção e comércio dos países onde essas empresas alocam as várias etapas de sua cadeia de valor. O país desenvolvido, pilar da matriz da ETN, especializa-se em atividades de maior valor agregado, como produção de componentes especializados, ou de atividades da criação do produto como *design* e pesquisa e desenvolvimento (P&D). O país em desenvolvimento, geralmente local onde fica o chão de fábrica, é encarregado da produção e montagem do manufaturado (SARTI; HIRATUKA, 2010; PINTO; FIANI; CORRÊA, 2017). A dinâmica da produção da CGV pode ser explicitada nas chamadas “curvas sorriso”, como a apresentada abaixo.

Figura 1 - “Curva sorriso” da cadeia global de valor



Fonte: Corrêa, Pinto e Castilho (2017)

Uma importante manifestação de cadeias globais de valor são as chamadas cadeias de valor orientadas ao comprador[4]. Este tipo de cadeia refere-se a uma organização no qual a matriz, geralmente grandes varejistas ou proprietários de marcas, apresentam um papel central na coordenação e direcionamento dos processos de produção e distribuição. Neste modelo de CGV, a demanda e as preferências do consumidor final ditam e moldam as atividades dentro da estrutura da cadeia. Esta dinâmica contrasta com outros tipos de cadeias de valor, como a orientada ao produtor[5], no qual o foco principal é a eficiência produtiva e a redução de custos. Nas cadeias de valor orientadas ao comprador, o *design* e a publicidade são fatores chave de atividades de alto valor adicionado (BRUN; GEREFFI; ZHAN, 2019). Assim como em outras cadeias de valor, os processos de produção são externalizados e divididos em fornecedores especializados ao redor do mundo. No entanto, este modelo de estrutura de produção diferencia-se por ter um foco na rápida resposta em mudanças nas preferências do cliente e em tendências do mercado. Como veremos mais adiante neste trabalho, o contato mais próximo com o consumidor final e a capacidade de customização em larga escala que as tecnologias da

[4] No inglês, *buyer-driven value chains*.
[5] No inglês, *producer-driven value chains.*

Indústria 4.0 possibilita podem ser tendências que alterem a disposição geográfica deste tipo de CGV, encurtando a cadeia produtiva e concentrando a indústria nos países centrais.

Com o sucesso das operações das Zonas Econômicas Especiais (ZEEs) chinesas e dos influxos de IDE, o país asiático se inseriu globalmente como polo de atração de corporações industriais. Através do alto dinamismo centrado na industrialização acelerada e pela elevada corrente de comércio, a China passou a constituir, expressivamente a partir dos anos 2000, a "fábrica do mundo", um centro de distribuição de manufaturados para todo o globo. Nas palavras de Medeiros (2004, p. 170): "A China transforma-se, assim, num polo de atração para as atividades processadoras, mas também, graças ao seu mercado interno, num grande centro importador".

Essa dinâmica concorrencial entre China e Estados Unidos despontou, entre diversas desavenças extraoficiais, uma guerra tecnológica entre as duas potências. Este cenário foi ainda mais agravado com a crise financeira global de 2008, que viu o crescimento econômico estadunidense frear, enquanto o chinês continuou a demonstrar notável ritmo de crescimento. É nesse cenário que essas duas potências desenvolvem políticas industriais de inovação tecnológica na cadeia produtiva, em especial utilizando as tecnologias da Indústria 4.0 para tal. Exemplos de políticas industriais de ambos os países serão abordadas no próximo item deste capítulo.

1.2 Acirramento da concorrência internacional e a transição rumo à Indústria 4.0

A análise da transformação produtiva dos anos 1970 trouxe importantes estudos sobre as relações complexas entre cooperação e competição e em relação ao aprendizado tecnológico e inovativo que a política industrial absorveu ao longo dos anos (DIEGUES; ROSELINO, 2020). Esta transformação foi ainda mais manifesta no contexto pós crise financeira de 2008, no qual há o questionamento da liderança tecnológica dos países centrais e a emergência da China como ator central do sistema econômico internacional (LUCENA; ROSELINO; DIEGUES, 2020).

Antes de uma transformação no paradigma tecnoprodutivo, o contexto econômico e comercial internacional provocou nos países centrais uma mudança na estratégia de política industrial.

> Por parte dos países centrais, assiste-se à retomada de iniciativas explícitas de política industrial que buscam reconfigurar os determinantes da competitividade de forma a se contrapor à escalada da contestação chinesa às suas respectivas estruturas produtivas e, assim, restabelecer a hierarquia historicamente construída entre as nações no que diz respeito às suas superioridades produtiva e tecnológica (DIEGUES; ROSELINO, 2020, p. 3).

Em termos gerais, essa nova estratégia de política industrial não é um processo espontâneo, e sim decorrente de um apoio estatal a setores que já apresentam vantagens comparativas, com uma abordagem mais tecnológica e disruptiva. Nas palavras de Diegues e Roselino (2020, p.11-12): "[...] o ressurgimento de políticas industriais explícitas [...] está relacionado tanto com o enfrentamento de megatendências relacionadas às transformações sociais, demográficas e ambientais quanto às possíveis redefinições das assimetrias competitivas internacionais". Com a retomada da análise econômica estruturalista, nota-se um foco maior na produtividade setorial e em padrões de mudança estrutural nos países, e formas como essas análises pode influenciar novas políticas industriais (ANDREONI, 2020)

Apesar do fluxo crescente de troca internacional e financeirização que marcou o século XX tenha se estabilizado desde 2008, o mundo está mais interconectado do que nunca (MANYIKA et al., 2016). Neste contexto, dois *players* importantes ganham força no mercado e prosperam no cenário da globalização tecnológica: a multinacional digital da economia de plataforma e a multinacional de tecnologia de informação e comunicação. Estes atores lideram as forças de disrupção e desintermediação que transformam a manufatura internacional e as cadeias globais de valor no boom da Quarta Revolução Industrial (BRUN, GEREFFI, ZHAN, 2019).

> As plataformas digitais são a chave para essa nova era de globalização. Ao longo das últimas duas décadas, as maiores corporações construíram suas próprias plataformas digitais para organizar fornecedores, conectar com clientes e permitir comunicação interna e compartilhamento de dados para funcionários ao redor do mundo. [...] O seu uso de automação e algoritmos leva os seus custos marginais de adição de novas interações praticamente a zero, permitindo às maiores plataformas sustentar centenas de milhões de usuários globalmente (MANYIKA et al., 2016, p. 6, tradução nossa[6]).

A respeito das características da transformação digital, Brynjolfsson e McAfee (2014) identificam três aspectos que explicam a ruptura das relações econômicas: o crescimento exponencial da velocidade do processador de circuito integrado, a replicabilidade da informação digital a praticamente custo zero e a habilidade de recombinar inovações de maneira interoperacional e interconectada. Esses conceitos são a base da integração, automação e fluidez que as novas tecnologias permitem, com impactos significativos na composição e produtividade do modelo produtivo contemporâneo.

---

[6] No original: "*Digital platforms are key to this new era of globalization. Over the past two decades, the largest corporations built their own digital platforms to manage suppliers, connect to customers, and enable internal communication and data sharing for employees around the world. [...] Their use of automation and algorithms drives the marginal costs of adding new interactions practically to zero, allowing the biggest platforms to support hundreds of millions of global users.*"

A digitalização traz consigo efeitos complementares nas cadeias de valor. Andreoni (2020) explicita a relação de dependência entre a manufatura e os serviços em um ecossistema industrial. A "servitização" da economia seria a fundamentação de serviços como modelo de negócio, e pode ocorrer transformando equipamentos ou atividades manufatureiras em serviços oferecidos por provedores externos (BRUN; GEREFFI; ZHAN, 2019). Um exemplo dessa tendência ao modelo de serviços foi o caso da General Electric exposto por Brun, Gereffi e Zhan (2019), no qual a maior parte do lucro da GE resulta da manutenção e serviço dos motores de aeronaves, e não da sua venda propriamente dita. Com essa realização, a GE alterou seu modelo de negócios, passando de uma fornecedora de produtos e componentes para uma provedora de potência e propulsão, transformando o foco de manufatura para serviços.

Com a crise financeira global de 2008, quatro dinâmicas nas cadeias globais de valor passaram a se concretizar: a racionalização, a regionalização, a resiliência e a digitalização. Com a racionalização, as corporações transnacionais consolidam suas cadeias de suprimentos para incluir fornecedores mais eficientes em menor quantidade (GEREFFI; LEE, 2012), com a realização de que a redução de custos de manutenção de grandes redes de fornecimento seria vantajosa, uma vez elencados os fornecedores estratégicos que poderiam prover a maioria dos componentes valiosos. A regionalização implica que há uma tendência de empresas nos países centrais de alocarem sua produção em áreas de baixo custo em sua região. É o caso de empresas estadunidenses estendendo cadeias de suprimento no México e empresas chinesas investindo recursos em países vizinhos como Vietnã e Myanmar. Esse tópico será mais explorado na discussão das vantagens do *nearshoring* e da análise da política industrial dos Estados Unidos e China. A regionalização também se refere ao crescimento de transações Sul-Sul, no qual países em desenvolvimento expandem as suas relações comerciais buscando integração e reversão do cenário econômico global. A terceira dinâmica é a resiliência, que pode ser desenvolvida elevando o número de instalações de produção de fornecedores chave e aumentando o inventário para reduzir o risco de eventos disruptivos. A quarta dinâmica, e a principal no contexto desse projeto, é a digitalização, fenômeno que incrementa a conectividade digital e as capacidades tecnológicas das cadeias de suprimentos (MUSSOMELI; GISH; LAAPER, 2016). Além do impacto direto dos efeitos das tecnologias já citadas, as cadeias globais de valor são diretamente impactadas com a combinação de tecnologias da informação (TI), como algoritmos de previsão, drones e robótica avançada, com tecnologias de operação (TO) modernas, que reduzem custos de computação e manutenção dos estoques.

Em um cenário de transformação da estrutura da concorrência capitalista e do modelo de produção com base na adaptação para a globalização digital, surge uma evolução

tecnoprodutiva, incorporando avanços tecnológicos que transformam significativamente os processos de produção. O termo "Indústria 4.0" refere-se à quarta revolução industrial, uma coleção de tecnologias que, uma vez combinadas, podem transformar a maneira como produtos e serviços são criados, produzidos e entregues (BRUN; GEREFFI; ZHAN, 2019). As transformações tecnológicas impactam a dinâmica concorrencial: “[...] [As mudanças tecnológicas] afetam a produção capitalista, desde a constituição de formas de organização da produção intrafirma até a configuração geográfica da atividade manufatureira em escala internacional.” (LUCENA; ROSELINO; DIEGUES, 2020, p. 116). As características, tecnologias e aplicabilidade da I4.0 em diferentes setores e seu impacto na geração de valor é um tema que será discutido no item 1.3 deste capítulo. Por enquanto, nos interessa a compreensão do surgimento desta revolução tecnológica como instrumento de reorganização da dinâmica de competição e acumulação das grandes potências capitalistas e a instituição de um novo paradigma.

A Indústria 4.0 oferece oportunidades significativas para inovação em processos de produção, produtos e modelos de negócios. As grandes potências globais capitalistas buscam estar na vanguarda dessas inovações para manter ou aumentar sua competitividade global. Os principais *players* implementam políticas públicas e estratégias nacionais que incentivam a adoção das novas tecnologias como parte de sua visão de desenvolvimento econômico a longo prazo. O objetivo da formalização das estratégias industriais nacionais é similar, mas a motivação de cada país é divergente.

O estabelecimento de estratégias industriais é crucial no contexto da Indústria 4.0, pois esta nova onda tecnológica representa uma disputa global pela liderança em áreas-chave que moldarão o futuro da produção e da economia. A I4.0 não é um processo meramente tecnológico e espontâneo, mas sim impulsionado por políticas industriais e tecnológicas deliberadas de diferentes países. O desenvolvimento de planos industriais de acompanhamento da inovação permite com que os países direcionem investimento em P&D, infraestrutura e capital humano, além de promover a colaboração entre empresas, universidades, centros de pesquisa e governos. As estratégias industriais bem-sucedidas podem gerar empregos de alta qualidade, aumentar a produtividade e impulsionar o crescimento econômico do país. No contexto internacional, programas como o *Made in China 2025* da China, o *Revitalize American Manufacturing Act* dos Estados Unidos, o *Industrie 4.0* da Alemanha, o *Robotic Revolution Incentive* do Japão e o *Manufacture Movement Innovation 3.0* da Coréia do Sul buscam alavancar as tecnologias da Indústria 4.0 para fortalecer sua competitividade, impulsionar o crescimento econômico e garantir sua posição no cenário global (LUCENA; ROSELINO;

DIEGUES, 2020). Em linhas gerais, toma-se como prioridade a utilização dos processos de automação industrial para estimular os setores de alta tecnologia para o crescimento econômico dos países.

A abordagem da política industrial de cada país é um tema de pesquisa interessante. Os Estados Unidos, por exemplo, com o objetivo de manter a sua posição de potência hegemônica, optou por focar suas políticas na recuperação do setor manufatureiro. Em 2011, o presidente Barack Obama inaugurou um programa chamado *Advanced Manufacturing Partnership* (AMP), que culminaria em um esforço nacional para investimento governamental em tecnologias emergentes com o objetivo de gerar emprego de qualidade na indústria manufatureira e elevar a competitividade americana. O programa formaliza investimentos em tecnologias oriundas da chamada "Terceira Revolução Industrial", como a biotecnologia e nanotecnologia e, posteriormente, técnicas mais associadas à I4.0, como a manufatura aditiva, robótica e inteligência artificial para reduzir custos na manufatura e acelerar o desenvolvimento produtivo (THE WHITE HOUSE, 2011). Este planejamento teve continuidade na reunião do AMP 2.0 em 2014, que estabeleceu uma rede de parcerias público-privadas para o desenvolvimento de instalações de alta tecnologia e promover a hegemonia estadunidense na produção avançada (MIT, 2014). Em termos gerais, a experiência de política industrial americana se reflete na recuperação do setor manufatureiro por meio de estímulos a investimentos em P&D e desenvolvimento de inovações tecnológicas para uso industrial em larga escala.

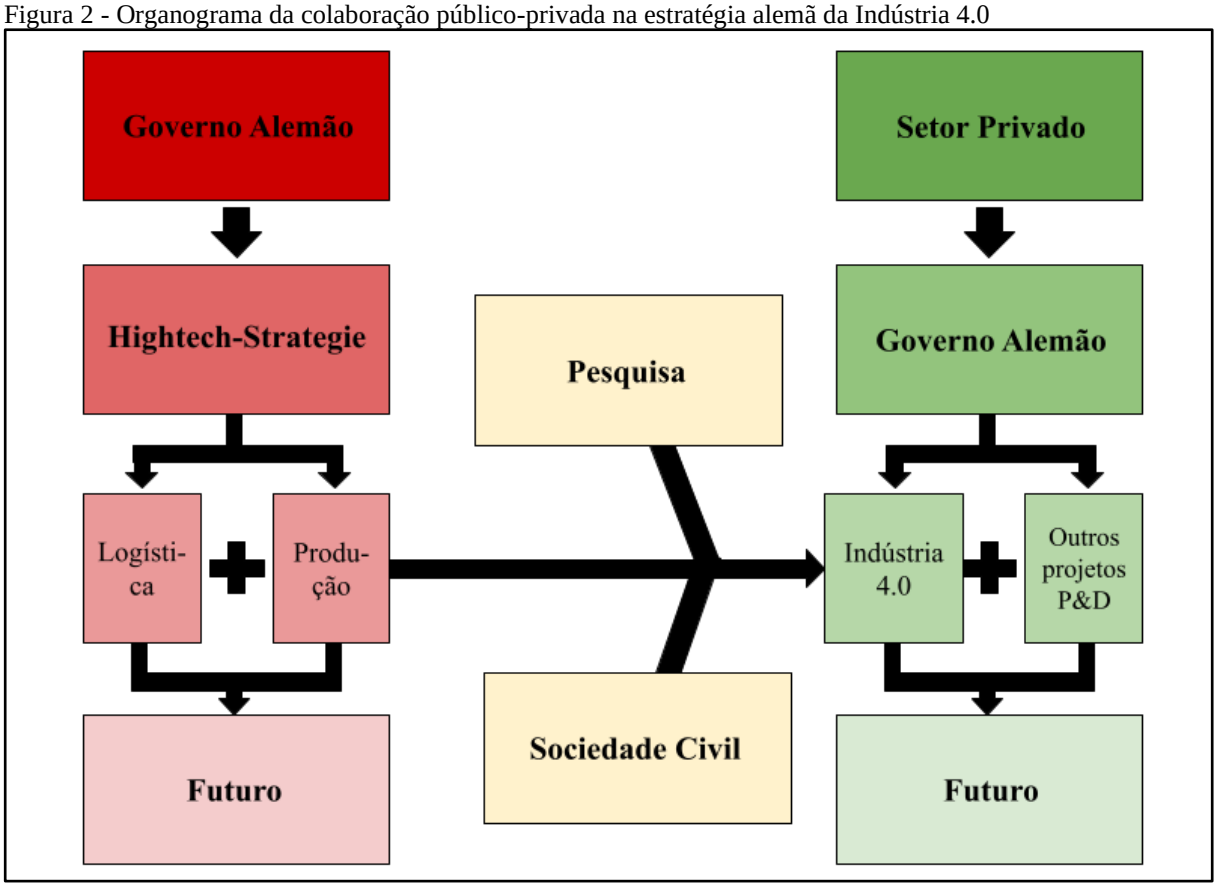
A abordagem alemã para o desenvolvimento de políticas industriais ancoradas na I4.0 é um processo pioneiro e amplamente estudado por *policymakers* ao redor do mundo, uma vez que essas tecnologias se tornaram um símbolo da determinação do país em assegurar o seu futuro como um dos principais centros manufatureiros do mundo. As primeiras medidas do governo alemão para o incentivo da revolução da alta tecnologia industrial ocorreu em 2006, com a estratégia "*Hightech Strategie*", elaborada pela União de Pesquisa de Economia e Ciência[7] e pela Comissão de Especialistas em Pesquisa e Inovação[8] (SANTIAGO, 2018). Esse plano de ação recebeu atualizações até 2014 por meio do Governo Federal Alemão e seus ministérios, e referia-se principalmente a incentivos estatais em P&D e TICs (BMBF, 2006). Entre os muitos pontos chave priorizados pelos documentos do "*Hightech Strategie*", destaca-se o investimento em inovações por meio de tecnologias transversais no cenário da produção;

[7] Forschungsunion Wirtschaft-Wissenschaft.
[8] Expertenkommission Forschung und Innovation.

o crescimento sustentável, a competitividade e a ampliação do mercado de trabalho por meio da digitalização; o apoio às pequenas e médias empresas a incrementar a capacidade de inovação por meio da promoção de uma rede entre essas empresas e o setor de pesquisa; o fortalecimento do apoio a *start-ups*, particularmente para elevar o seu contato com instituições de ensino e pesquisa; e melhorar a estrutura de mercados de capital de risco no território alemão (ANDREONI, 2016; BMBF, 2006, 2010, 2012; BMWi, 2010; SANTIAGO, 2018).

A experiência alemã ocorreu de maneira coordenada entre empresas, Estado nacional e sindicatos, sendo o Estado um direcionador da política industrial, em uma política denominada *bottom-up*. Essa estratégia é muitas vezes descrita como uma abordagem dupla, uma vez que a combinação dos planos de ação de todos os ministérios e agentes teve como objetivo tanto a estabilização da Alemanha como o principal mercado de tecnologias da I4.0, mas também como o principal fornecedor destas (OCDE, 2014).

Figura 2 - Organograma da colaboração público-privada na estratégia alemã da Indústria 4.0



Fonte: Elaboração própria com dados de Santiago (2018)

A figura 2 traz uma representação visual muito interessante da colaboração público-privada no desenvolvimento de políticas industriais alemãs no contexto da I4.0. No primeiro momento, o governo alemão buscou fomentar a inovação como fundação para o sucesso

econômico futuro do país e para assegurar sua posição no complexo industrial global. Ao mesmo tempo, empresas privadas estavam engajadas em processos de digitalização e automação, o que levou ao desenvolvimento de técnicas mais avançadas em P&D. Com o passar do tempo, companhias privadas passaram a adotar tecnologias da I4.0, que seriam incorporadas pelo setor estatal, enquanto o governo encorajava a pesquisa e a sociedade civil a participar e contribuir para a conquista de objetivos relacionados à I4.0 (SANTIAGO, 2018).

É impossível trazer as estratégias de desenvolvimento industrial das grandes potências capitalistas ancoradas na ascensão de tecnologias da Indústria 4.0 sem trazer a perspectiva chinesa.

> O novo paradigma tecnoprodutivo da Indústria 4.0 representaria, portanto, uma das dimensões da resposta das economias avançadas à nova morfologia da produção que emergiu nas últimas décadas do séc. XX e, em particular, à ascensão da China inicialmente como centro manufatureiro e, progressivamente, também como potência tecnológica (DIEGUES; ROSELINO, 2020, p. 10).

A China, desde a década de 1950, passou por transformações econômicas e estruturais que direcionaram o rumo do desenvolvimento do país, transformando-a em um dos principais poderios econômicos do mundo (MEDEIROS, 2013). Nas palavras de Cintra e Pinto (2017, p. 382):

> Essa trajetória chinesa de desenvolvimento, ainda em construção, e que pressupõe um processo de aprendizado contínuo com avanços e recuos, articula uma estratégia nacional, inserida regional e globalmente, que tem como objetivo tornar a China um país moderno, rico e poderoso. Com isso, as políticas macroeconômica, industrial, de ciência e tecnologia, externa e de segurança são direcionadas pelo Estado para a construção de uma estabilidade política, a melhoria das condições de vida do povo chinês e a reconquista de uma posição internacional autônoma.

É a partir do cenário de consolidação da China como ator central do sistema econômico internacional e questionamento da liderança tecnológica de outros países centrais que as potências capitalistas começam a corrida tecnológica pelo avanço da I4.0. O país asiático, por sua vez, também tem realizado experiências em direção à inovação industrial, notadamente consolidando um sistema orientado para resultados. Um dos principais planos chineses de apoio à manufatura avançada é o *Made in China 2025*. "De fato, a ambição da China de se tornar o líder global em Ciência, Tecnologia e Inovação está ligada à sua capacidade de evoluir para um sistema nacional de inovação mais eficiente, robusto e efetivo" (UNESCO, 2015, p. 629, tradução nossa[9]). Entre as diretrizes da transformação industrial chinesa com o objetivo da automação industrial, estão a promoção da inovação tecnológica, a melhora da qualidade dos

[9] No original: "Indeed, China's drive to become a global leader in STI is tied to its capacity to evolve towards a more efficient, effective and robust national innovation system"

produtos e serviços disponíveis no mercado, a transformação da economia em um motor mais sustentável do desenvolvimento, a otimização da estrutura industrial e o incentivo à formação e qualificação dos recursos humanos e retenção de talentos (ARBIX et al., 2018). Diegues e Roselino (2023) dissertam que estas diretrizes possuem um desafio duplo: por um lado o aumento da pressão competitiva causada por iniciativas das potências capitalistas de impulsionar a fronteira tecnológica em direção à I4.0 é visto como uma tentativa de reorganizar os determinantes de competitividade internacional e compensar a vantagem competitiva da indústria chinesa; por outro lado a busca por redução de custos com a realocação de indústrias em outros países do Leste e Sudeste Asiático pode reduzir a competitividade relativa da China, especialmente em setores de média e baixa intensidade tecnológica.

Em suma, a ascensão da Indústria 4.0 marcou uma revolução no paradigma tecnoprodutivo capitalista, redefinindo a maneira como as economias globais produzem, distribuem e consomem bens e serviços. Esse novo estágio tecnológico não apenas otimizou os processos industriais, mas também impulsionou uma transformação profunda nas estratégias de política industrial das grandes potências. A I4.0 não apenas redesenhou a paisagem da produção industrial, mas também redefiniu o jogo das políticas industriais. As grandes potências reconheceram a importância de abraçar a inovação tecnológica para sustentar o crescimento econômico e a competitividade global. Essa revolução continua a moldar as estratégias industriais, exigindo adaptação constante em um cenário econômico dinâmico e cada vez mais digital.

1.3 A Indústria 4.0: características, dinâmica de concorrência e heterogeneidade

A chamada Quarta Revolução Industrial, como veio a ficar conhecida o espectro de novas tecnologias que integram o mundo físico, digital e biológico em “sistemas cyber-físicos”, ou Indústria 4.0, termo popularizado pela McKinsey & Company para descrever a próxima fase da digitalização do setor manufatureiro, é um conjunto de tecnologias com aplicações específicas em um novo estágio de produção (BUTOLLO; JÜRGENS; KRZYWDZINSKI, 2018). É o resultado de um processo disruptivo liderado por algumas evoluções técnicas e tecnológicas, como a elevação do volume de dados, conectividade, emergência de capacidades de análise e inteligência de mercado, novas formas de interação entre homem e máquina, sistemas de realidade aumentada, robótica avançada e manufatura aditiva (BAUR; WEE, 2015).

Brun, Gereffi e Zhan (2019) explicitam os nove pilares das tecnologias que compõe a Indústria 4.0, de acordo com o Boston Consulting Group. São elas: (i) o big data e a ciência da análise, usados para coletar e avaliar dados de equipamentos e sistemas de produção para apoio

das tomadas de decisão; (ii) os robôs autônomos, se desenvolvendo para operar em conjunto com o trabalho humano; (iii) as simulações, arquitetadas para criar modelos de máquinas e produtos em tempo real, adaptando-se à desequilíbrios na produção e elevando a qualidade; (iv) a integração horizontal e vertical de sistemas, combinando empresas, fornecedores e consumidores, além de conectar departamentos internos dentro da companhia, como gestão de estoque, planejamento de produção e sistema de vendas; (v) a Internet das Coisas, ou *Internet of Things* (IoT), conceito que se refere à interconexão de dispositivos (no caso, industriais) na internet, criando uma rede de comunicação com sistemas de TI, permitindo coleta de dados e decisões em tempo real; (vi) a cyber-segurança, indispensável no contexto de sistemas industriais complexos conectados à internet; (vii) a nuvem, mecanismo que permite elevação do tempo de reação de processos, aumentando a conectividade e o acesso a dados pelos sistemas de decisão da companhia; (viii) a manufatura aditiva, ou impressão 3D, que permite a criação de produtos ou componentes personalizados, muitas vezes complexos ou geometricamente desafiadores, e podem ser produzidos na matriz, reduzindo custos de logística e estoques; e (ix) a realidade aumentada, inovação logística que permite a visualização da cadeia de fornecedores e operações no armazém.

Na prática, a distinção entre indústria e serviços se torna menos relevante uma vez que as tecnologias digitais são conectadas com a produção industrial e com a oferta de serviços (STRANDHAGEN et al., 2017). A transformação tecnológica da nova Revolução Industrial pode ser tão impactante que a própria natureza e os limites de setores consolidados da indústria se adaptam (ANDREONI, 2020).

A integração e aplicação industrial das tecnologias aqui citadas é o que de fato possibilita um modo de produção moderno, automatizado e digital. Essa integração ocorre por meio da construção de um ambiente que coordena e operacionaliza operações físicas e virtuais, os chamados Sistemas Cyber-Físicos (do inglês *Cyber-Physical Systems*, ou CPS) (REJIKUMAR et al., 2019). "Na mais simples definição, sistemas cyber-físicos são a integração de computadores, redes e sistemas físicos" (LEE; SESHIA, 2011, p. 502, tradução nossa[10]). Os CPS consistem em um ambiente de elementos e subsistemas autônomos e cooperativos, conectando comunicações e interações em diferentes situações, em toda a linha de produção (HOZDIĆ, 2015). Essa conectividade entre humanos e máquinas no sistema produtivo pode ocorrer via Internet das Coisas, pela automação de sistemas integrados, pela

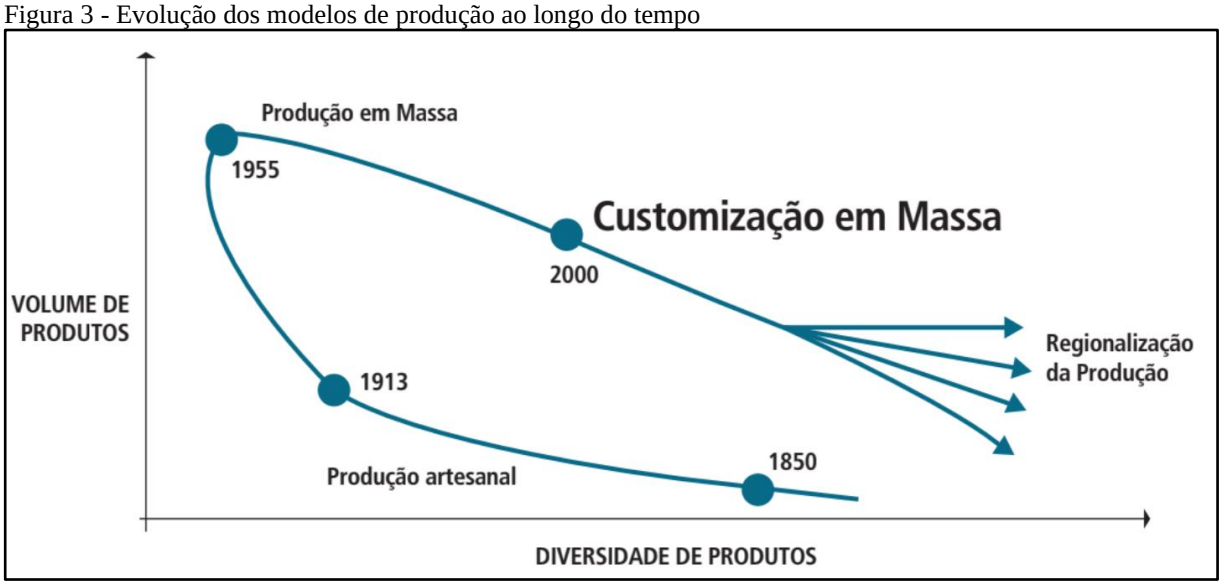
[10] No original: "*In the simplest definition, cyber – physical systems are the integration of computers, networks and physical systems*".

inteligência artificial e robótica avançada, em processos que flexibilizam e aperfeiçoam a lógica industrial (HERMANN et al., 2016).

Uma vez estabelecido o ambiente de integração cyber-física, o processo produtivo passa a tomar vantagem da produção automatizada e digital. A chamada "*Smart Factory*", "*U-Factory*" (RAJ; LEE; STANKOVIC, 2010), "*Factory-of-things*" (LUCKE; CONSTANTINESCU; WESTKÄMPER, 2008) ou "fábrica do futuro" (HAMEED; DURR; ROTHERMEL, 2011) é um ambiente produtivo no qual a maioria das ferramentas é automatizada, desde a produção até o transporte. Por meio dos CPS, a fábrica conecta cada uma das máquinas da rede, o que permite o rastreamento e a comunicação de cada etapa da cadeia produtiva. Esse ambiente é alimentado pelo *big data*, conjunto extenso de dados processados na nuvem. Esse processo, além de melhorar a eficiência operacional e a velocidade da produção, possibilita uma maior personalização industrial, permitindo às empresas a customização das experiências para clientes, oferecendo produtos e serviços mais alinhados com suas necessidades e preferências individuais (SANTIAGO, 2018).

Em relatório da Confederação Nacional da Indústria (CNI, 2018), é exposto que os avanços das tecnologias associadas à Indústria 4.0 permitiu uma customização em massa por parte das empresas o que reduziu o volume da produção, mas ampliou a sua diversidade, conforme apresentado no gráfico abaixo:

Figura 3 - Evolução dos modelos de produção ao longo do tempo



Fonte: CNI (2018)

Com a produção voltada para produtos customizados, as demandas dos clientes condicionam a diferenciação do portfólio. Esse modelo de negócio torna viável a fabricação de bens que antes enfrentariam barreiras de entrada associadas à escala mínima de produção. Em

uma visão de localização geográfica da matriz produtiva, esse contato entre produtor e consumidor permite o desenvolvimento de uma produção descentralizada e mais próxima ao público final. Tecnologias como a Internet das Coisas podem permitir às empresas reagir às demandas dos consumidores, enquanto impressoras 3D (manufatura aditiva) permitem a realização operacional da customização. Nesse modelo de negócio, os ciclos longos de produção da manufatura globalizada podem se mostrar desvantajosos, uma vez que as companhias que reagirem rapidamente às demandas dos consumidores tendem a ser premiadas. O processo descrito de automação permite a produção em larga escala com atendimento a uma demanda cada vez mais fragmentada, o que por sua vez possibilita que a fábrica colete e analise dados dos seus produtos e usuários e, por meio da aplicação da inteligência artificial, aperfeiçoa as suas tomadas de decisões e customização dos seus produtos (SCHWAB, 2018). Ainda a respeito da customização da produção que as *smart factories* com tecnologias aplicadas da I4.0 permite, no capítulo 2 desta monografia será tratado o caso das *Speedfactories*, fábricas da Adidas que tinham a premissa de serem altamente customizáveis, especializadas, automatizadas, e produzidas nos países centrais, próximos ao seu público alvo.

Um exemplo de *smart factories* que lideram o escalonamento de tecnologias de produção avançadas são os chamados "faróis" da rede *Global Lighthouse Network* (GLN), um grupo de indústrias manufatureiras que obteve importante progresso na utilização de tecnologias da Quarta Revolução Industrial na cadeia produtiva, obtendo o título de "empresas farol", que lideram e guiam o caminho para novas empresas do setor (BETTI, BOER, GIRAUD, 2020). Dentro da rede GLN, há um grupo ainda mais seleto de empresas, ainda mais especializadas, que aplicam as tecnologias da I4.0 não somente na planta produtiva, mas em toda a cadeia de valor. São os chamados faróis integrados de ponta a ponta (do inglês *end-to-end Lighthouses*, ou E2E). Portanto, a digitalização e automação ocorre em duas esferas: na manufatura em si ocorre a digitalização da montagem e do maquinário, da manutenção, da gestão de desempenho e qualidade, e da sustentabilidade digital; no restante dos processos E2E, ocorre a conectividade da rede de abastecimento, o desenvolvimento de produção 3D, automatizado e em realidade aumentada, o planejamento dinâmico E2E, o serviço de entrega digitalizado e rastreável, e a conectividade com o usuário por meio do monitoramento de dados (BETTI; BOER, 2019).

> Os novos faróis E2E conseguiram ampliar as operações digitais na fábrica e, ao mesmo tempo, remover barreiras entre as funções da cadeia de valor por meio da conectividade digital. Os faróis E2E continuaram a ampliar os limites do avanço tecnológico, expandindo para além das quatro paredes do local da fábrica para gerar

> benefícios exponenciais e remodelar a jornada do cliente (BETTI; BOER, 2019, p. 8, tradução nossa[11]).

A digitalização industrial permite a desintermediação das cadeias de suprimentos, permitindo que ofertantes de bens e serviços direcionem seus produtos diretamente aos usuários finais, sem contato com redes de venda e distribuição. Em transações *business-to-business* (B2B)[12], a desintermediação resulta no encurtamento das cadeias globais de valor, uma vez que a empresa pode ultrapassar funções usualmente exercidas por empresas terceiras. Em transações *business-to-consumer* (B2C)[13], é o surgimento de plataformas online que ameaçam a estruturação vertical do modelo de negócio tradicional. As plataformas alavancaram o mercado de trabalho de prestação de serviços (casos como Uber e AirBnB) e trabalhos por contrato, que conectam o provedor e o usuário de maneira mais simplificada e dinâmica. Um segmento em que a aplicação de técnicas de coordenação das cadeias de suprimentos digitalizados mostra seu potencial é o estabelecimento de um sistema de produção sob demanda de comércio online, ou e-commerce (BUTOLLO, 2020). Em seu livro *Smart Business: Alibaba, the Future of Strategy, and What it Means for You*, Zeng (2018) exemplifica o caso da Alibaba Group, empresa mãe de companhias como AliExpress e Taobao. Zeng discorre que Jack Ma e os cofundadores da empresa moldaram a estratégia de negócio para um modelo sob demanda, mas a preços competitivos com indústrias de produção em massa. Esse modelo de comércio é chamado pelo autor de *consumer-to-business* (C2B)[14], e explora o cenário vasto e diverso de fornecedores de insumos tecnológicos da China e o mercado consumidor potente. A união desses fatores resulta em uma produção acelerada, como a vista nas chamadas "Vilas Taobao", que promovem o desenvolvimento de um "e-commerce rural" na China.

"Vilas Taobao" ou Taobao Villages são aglomerados rurais com residências operando seus próprios comércios na plataforma Taobao, e é um mecanismo de expansão do e-commerce chinês, que fundamentalmente pode ampliar a disponibilidade de trabalho e economia dos setores rurais (LI, 2017). O Grupo Alibaba, em parceria com o governo chinês, assinou acordos em diferentes províncias para promover o *e-commerce* rural, além de programas de combate à pobreza. Os vendedores das Vilas Taobao desenvolveram agrupamentos de negócios de *e-commerce*, formando uma sinergia com indústrias complementares como serviços de entrega

---

11 No original: "*The new E2E Lighthouses have been able to scale up in-factory digital operations while removing barriers across functions in the value chain through digital connectivity. E2E Lighthouses have continued to push the envelope of technological advancement, expanding beyond the four walls of the factory site to drive exponential benefits and reshape the customer journey*";

12 Modelo no qual empresas fornecem bens ou serviços para outras empresas;

13 Modelo no qual empresas fornecem bens ou serviços para o consumidor final;

14 Modelo no qual empresas personalizam sua produção com base na demanda dos consumidores.

expressa. A dinâmica deste modelo de negócio e cadeia de distribuição vai de acordo com o próprio princípio industrial desenvolvido pelas tecnologias da I4.0 nos espaços de técnica elevada. Com a computação em nuvem e a manufatura aditiva, percebe-se uma descentralização da produção. As informações não são mais armazenadas de forma centralizada, mas localizadas diretamente no próprio produto. E uma vez que a tomada de decisão sobre mudanças na produção pode ser descentralizada, a manufatura na I4.0 pode consistir de diversos sistemas e máquinas com funções distribuídas ao longo de uma rede, sem uma hierarquia rígida.

O conhecimento dos modelos e organizações da malha industrial de empresas vanguardistas na utilização de tecnologias de automação, digitalização e integração inteligente na cadeia de suprimentos será importante para a base da pesquisa desta monografia: o impacto destas tecnologias e modelos de produção na decisão de localização geográfica das diferentes etapas das cadeias globais de valor em diferentes setores. Por meio de análises setoriais, será possível trazer uma perspectiva mais concreta de política industrial para diferentes modelos de negócio, e o que pode levar às perspectivas de *offshoring*, *reshoring* ou *nearshoring*, termos a serem tratados no próximo capítulo.

Em suma, a transformação estrutural da dinâmica dos principais setores industriais passa por uma mudança de estratégia fundamentada no jogo político internacional dos últimos dez anos. Segundo Manyika et al (2016, p. 4, tradução nossa[15]): "A globalização digital torna as decisões políticas ainda mais complexas. Cadeias de valor estão mudando, novos núcleos estão emergindo, e atividade econômica está sendo transformada". Este cenário abre a discussão do próximo capítulo do estudo da dinâmica da concorrência, da acumulação e de *drivers* tecnológicos em uma visão setorial, a fim de estimar os impactos setoriais da I4.0.

O estudo das políticas governamentais, das mudanças nas condições de mercado e das transformações tecnológicas na configuração da indústria são essenciais para compreender a estratégia por trás dos motivos que levam as empresas a adotarem o *reshoring.* As decisões de localização da fábrica e das etapas de desenvolvimento industrial, além de estarem ligadas à condições de nível macroeconômico, dependem de tecnologias e dinâmicas específicas de determinadas indústrias.

Um exemplo de dinâmica que a digitalização transformou nas CDVs foi a "servitização" como um modelo de negócio tanto para indústrias manufatureiras como para cadeias do setor de serviços. A servitização pode ocorrer de três maneiras principais: i) o oferecimento de um

15 No original: "*Digital globalization makes policy choices even more complex. Value chains are shifting, new hubs are emerging, and economic activity is being transformed*"

serviço de oferta de bens de capital por um provedor externo, por meio de aluguéis ou serviços de assinatura; ii) o oferecimento de atividades relacionadas à manufatura como um serviço externo, como no caso de se terceirizar as equipes de manutenção ao maquinário e controle de qualidade em etapas específicas da produção; e iii) a captura de dados do produto e uso como um serviço de valor agregado, para segmentar clientes e customizar características do produto (BRUN; GEREFFI; ZHAN, 2019; ANDREONI, 2020).

A digitalização industrial e a adoção de tecnologias da I4.0 impulsionam a servitização da indústria porque permitem que empresas transformem a forma como oferecem produtos e serviços, criando novos modelos de negócio e agregando valor ao cliente. Com a digitalização, as empresas podem implementar modelos de negócios baseados em assinatura ou aluguel, onde outras empresas pagam pelo uso do equipamento em vez de comprá-lo. Tecnologias como IoT e sensores inteligentes permitem monitorar remotamente o desempenho dos equipamentos, coletando dados em tempo real sobre uso, desempenho e necessidade de manutenção. Isso facilita o fornecimento de serviços de aluguel de máquinas, pois os fornecedores podem garantir o funcionamento eficiente dos equipamentos e oferecer manutenção proativa. Por meio de *machine learning* e análise de dados, prestadores de serviços externos podem monitorar e analisar o desempenho das máquinas e dos processos de produção. Isso possibilita identificar problemas antes que ocorram falhas, otimizando o tempo de produção e reduzindo custos. Assim, indústrias podem contratar esses serviços especializados, agregando mais qualidade e eficiência às suas operações sem a necessidade de internalizar esses processos. tecnologias como *big data*, análise de dados e inteligência artificial permitem que empresas coletem e analisem grandes volumes de dados sobre o uso e o desempenho de seus produtos. Isso viabiliza a criação de serviços de valor agregado baseados em dados, como a personalização de produtos e o desenvolvimento de soluções sob medida para diferentes segmentos de clientes.

O impacto das tecnologias da I4.0, tanto no processo manufatureiro como no desenvolvimento de ofertas de serviços industriais, será analisada em um contexto setorial no próximo capítulo desta monografia. A adesão de cada tecnologia por setor terá um papel importante no dinamismo de políticas de *reshoring* e transformações das cadeias globais de valor.

2. *RESHORING* E IMPACTOS SETORIAIS DA INDÚSTRIA 4.0

"Após anos terceirizando para países de baixo custo de mão de obra e por uma variedade de razões, as empresas estão cada vez mais considerando trazer o trabalho de volta para casa ou para outros países." (WHITE; BORCHERS, 2016, p. 2015, tradução nossa[16])

A discussão sobre a "desglobalização" ganhou força a partir de 2008, após a crise financeira global que expôs a vulnerabilidade das economias interconectadas. A quebra do mercado imobiliário nos Estados Unidos rapidamente desencadeou uma recessão mundial, evidenciando os riscos de uma dependência excessiva das cadeias de suprimento globais e dos fluxos financeiros internacionais. Além disso, o crescimento de movimentos populistas e nacionalistas em várias partes do mundo, combinado com o aumento das tensões comerciais, como a guerra tarifária entre os Estados Unidos e a China, reforçou o debate sobre a necessidade de uma maior autonomia econômica e de políticas protecionistas (DIEGUES; ROSELINO, 2020).

O segundo capítulo deste trabalho tem como objetivo explorar como a transformação da dinâmica da concorrência capitalista impactou as tomadas de decisões dos principais atores da indústria manufatureira global, e quais os impactos que a evolução tecnológica do processo produtivo teve nessa dinâmica.

A primeira seção do capítulo iniciará com uma discussão da desaceleração da externalização expansiva do processo produtivo da indústria manufatureira a partir dos anos 2010. Em seguida, será apresentado um conectivo teórico entre a chamada "desglobalização" e a tendência de grandes empresas globais à prática do *reshoring*. Nesse momento, o conceito de *reshoring* e *nearshoring* será destrinchado, e serão introduzidos e analisados vários motivos que podem causar a decisão da relocalização da estrutura produtiva das cadeias globais de valor. Não por acaso, a disrupção do processo produtivo proporcionado pela implementação das tecnologias da Indústria 4.0 na cadeia industrial dialoga diretamente com a maioria dos fatores de estímulo à relocalização.

A segunda seção do capítulo terá como propósito propor uma análise setorial, com o objetivo de estudar quais áreas industriais têm maior propensão à adoção das tecnologias da I4.0 em suas dinâmicas produtivas, em especial os setores que identificam vantagens

[16] Do original: "*After years of outsourcing to low labor cost countries and for a variety of reasons, firms are increasingly considering moving work back home or to other countries*"

competitivas e operacionais na relocalização de suas cadeias produtivas. Essa análise será feita com base em estudos de relatórios de empresas de consultoria como McKinsey & Company, Deloitte e PwC, instituições como o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, a Confederação Nacional da Indústria, o Instituto Euvaldo Lodi, a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico e o Fórum Econômico Mundial, e pesquisas de estudo de caso como Eurofound (2019) e Ancarani e Di Mauro (2018). Serão mensuradas e identificadas quais os setores industriais mais passíveis de adoção de tecnologias disruptivas da Indústria 4.0, quais as tecnologias de digitalização industrial são mais relevantes para cada setor e, com base nessa agregação de tecnologias, quais os setores são mais suscetíveis à relocalização de seu corpo industrial, em especial com o enfoque de políticas de *reshoring* e *nearshoring*.

2.1 Mudanças no paradigma industrial pós 2008

A partir da crise econômica e financeira de 2008, passou-se a ter a percepção de que a globalização da produção havia passado do seu auge (BUTOLLO; STARITZ, 2022), e a discussão da "desglobalização" ganhou força, impulsionada por uma combinação de fatores, incluindo a crescente instabilidade econômica, a ascensão do nacionalismo e a busca por maior controle sobre as cadeias de suprimentos (JAMES, 2018). A crise expôs as fragilidades da globalização expansiva e alimentou um discurso nacionalista e protecionista.

A inicial "desglobalização política" no momento pós-crise gera uma tendência de unilateralismo institucional internacional. Esse unilateralismo é impulsionado por uma mentalidade "decisionista", que prioriza a tomada de decisão rápida e decisiva em detrimento de processos burocráticos e multilaterais:

> Uma consequência das crises financeiras é que a quebra de regras parece atraente e até necessária como resposta a circunstâncias excepcionais. Quando há um desafio existencial, as regras parecem ser limitações incômodas e desnecessárias à liberdade de manobra. Quase todo mundo gosta de uma isenção temporária das regras para evitar uma catástrofe. Há também maiores incentivos políticos para todos os tipos de ativismo: Nenhum funcionário eleito quer parecer que está parado, preso a regras complexas (e, pior ainda, a regras estrangeiras) (JAMES, 2018, p. 233-234, tradução nossa).[17]

[17] Do original: "*One consequence of financial crises is that breaking rules appears attractive and even necessary as a response to exceptional circumstances. When there is an existential challenge, rules seem to be cumbersome and unnecessary limitations on the freedom of maneuver. Almost everyone likes a temporary waiver of rules to avoid catastrophe. There are also greater political incentives to all kinds of activism: No elected official wants to look as if they are standing inactive, bound by complex rules (and even worse by foreign rules).*"

É no contexto da promoção de políticas nacionalistas que ganha força a discussão do *reshoring*. Em países em que não há pressão institucional para a prática da realocação produtiva, o *reshoring* surge como uma iniciativa *bottom-up*[18] (ANCARANI; DI MAURO, 2018).

2.1.1 *Reshoring*: definição, dimensões e causas

Existem três principais aspectos principais para compreender e definir a geografia de produção: a importância das aglomerações locais, os mecanismos intrafirma e relações internacionais que compõem as cadeias globais de valor (VANCHAN; MULHALL; BRYSON, 2017). O *reshoring*, ou repatriação da manufatura, envolve políticas de decisão empresarial que abordam os três aspectos.

O processo de transformação industrial conhecido como *reshoring*, também chamado de *backshoring*, se define como a relocação das capacidades, responsabilidades e dinâmicas manufatureiras de volta para o "Norte Global", ou seja, para o país de origem de dita indústria (BUTOLLO; STARITZ, 2022; HAGERTY, 2012). Gray et al. (2013) expande essa definição apontando quatro manifestações principais de decisões de *reshoring*: *reshoring* interno[19], no qual a empresa realoca suas instalações próprias em outros países para instalações próprias locais; *reshoring* para terceirização[20], no qual a empresa realoca atividades manufatureiras de instalações próprias em outros países para fornecedores locais terceirizados; *reshoring* para internalização[21], no qual a empresa realoca as atividades de fornecedores externos terceirizados para instalações próprias locais; e *reshoring* terceirizado[22], no qual a empresa realoca a atividade realizada por fornecedores externos terceirizados para fornecedores internos terceirizados. Esta distinção demonstra que existem diversos tipos e variações de *reshoring*.

> A GE, por exemplo, repatriou a fabricação de eletrodomésticos de sua instalação de produção na China para os EUA, em sua própria fábrica, para atender à demanda nos EUA, enquanto a Vaniman Manufacturing, sediada nos EUA, decidiu não mais comprar chapas de metal de um fornecedor estrangeiro e, em vez disso, adquirir de um fornecedor local para atender à demanda nos EUA. Ambos seriam considerados *reshoring* (mais precisamente, *reshoring* de volta para os EUA) (GRAY et al., 2013, p. 28, tradução nossa[23]).

---

18 Uma iniciativa "bottom-up" refere-se a uma abordagem ou processo em que ideias, decisões e ações se originam no nível mais básico, tipicamente dos funcionários, gerentes de nível inferior ou membros da comunidade, em vez de serem impostas pela alta administração ou liderança.

19 Do original: "*In-House Reshoring*";

20 Do original: "*Reshoring for Outsourcing*";

21 Do original: "*Reshoring for Insourcing*";

22 Do original: "Outsourced *Reshoring*"

23 Do original: "*GE, for example, reshored its appliance manufacturing from its production facility in China to the USA in its own plant to meet US demand, whereas US-based Vaniman Manufacturing decided to no longer buy sheet metal fabrication from an overseas supplier and to instead source from a local supplier to meet demand in the USA. Both would be considered reshoring* [...]"

As decisões de relocalização da manufatura, além de ligadas a características macroeconômicas, estão relacionadas a fatores como custo de mão de obra, possibilidades tecnológicas, fiscalização e regulação de patentes (KANO; TSANG; YEUNG, 2020; ASCANI; CRESCENZI; IAMMARINO, 2016). Essas decisões podem ser separadas em *drivers* intrafirma (específicas para o contexto daquela operação singular) e extrafirma (referentes a um contexto geral macroeconômico), como indicam os quadros abaixo.

Quadro 1 - *Drivers* intrafirma para decisões de *reshoring*

Correção de um erro gerencial na decisão do offshore	Superestimação da redução de custos com *offshoring*	- Consideração insuficiente de custos ocultos
		- Falta de capacidade interna de corretamente avaliar custos
	Estimação incorreta dos riscos e benefícios do *offshoring*	- Estrutura de tomada de decisão simplista
		- Racionalidade limitada
	Decisão apressada para o *offshoring*	- Conhecimento insuficiente do país receptor
		- Efeito manada
		- Planejamento insuficiente
Mudança na estratégia competitiva	Transição de uma estratégia de custos para uma estratégia de diferenciação de mercado	- Mudança para segmentos mais elevados do mercado
		- Política de responsabilidade social corporativa
		- Adoção de estratégias operacionais de "gestão enxuta"

Fonte: Elaboração própria com dados de Barbieri et al (2018), Bornert e Musolino (2024), Fel e Griette (2017), Kinkel (2014), Porter e Rivkin (2012), Sequeira (2020) e White e Borchers (2016)

Muitas vezes, a decisão de *offshoring* é feita com base em uma superestimação das economias de custos, sem considerar adequadamente os custos ocultos (logísticos, operacionais, de gerenciamento) (PORTER; RIVKIN, 2012). As empresas frequentemente tomam essas decisões de forma simplificada, focando apenas nos custos unitários, sem levar em conta fatores como a capacidade de resposta à demanda dos clientes. Além disso, o "efeito manada", onde as empresas replicam o comportamento de concorrentes sem uma análise aprofundada, pode levar a decisões precipitadas (BARBIERI et al, 2018). Estudos apontam que, em alguns casos, até dois terços das decisões de *reshoring* ocorrem em menos de cinco anos após o *offshoring* inicial, indicando uma correção rápida de julgamentos equivocados (KINKEL, 2014). O *reshoring* também pode ocorrer devido a mudanças estratégicas, como a transição de uma estratégia focada em custos para uma estratégia de diferenciação. Isso pode

envolver a reestruturação da empresa para atender a novos segmentos de mercado, implementar políticas de responsabilidade social corporativa (FEL; GRIETTE, 2017) ou adotar práticas de gestão enxuta (*lean management*). Nesse caso, o retorno da produção para o país de origem visa aumentar o valor agregado dos produtos e aproximar a empresa de sua rede de fornecedores.

Quadro 2 - *Drivers* extrafarma para decisões de *reshoring*

Drivers específicos do país receptor	Custo	- Aumento de custos operacionais na localização offshore (mão de obra, recursos, etc.)
		- Aumento de custos de transporte e logística
	Criação de valor	- Produtos de qualidade baixa manufaturados no offshore
		- Custos adicionais derivados da qualidade baixa (devolução, reprodução)
		- Qualidade insuficiente de capital humano
		- Alta rotatividade de funcionários
		- Problemas envolvendo redes de fornecedores locais
	Outros fatores de pressão	- Proteção insuficiente de direitos de propriedade intelectual e regulamentação
		- Alta complexidade de coordenação de campos de manufatura distantes
		- Falta de flexibilidade no transporte de produtos
		- Impossibilidade de prover serviços de customização
		- Instabilidades cambiais, riscos políticos, desastres naturais
Drivers específicos do país de origem	Custo	- Aumento de produtividade da firma do país de origem
		- Elevação da flexibilidade do mercado de trabalho
		- Capacidade produtiva disponível
		- Processos de automação industrial
	Criação de valor	- Acesso a mão de obra qualificada no país de origem
		- Alto nível de flexibilidade em logística, contato com cliente
		- Sinergia de ecossistemas: P&D, manufatura, fornecedores e mercado no mesmo local
	Outros fatores de atração	- Efeito "Made In": percepção de maior qualidade, alinhamento com valores da marca
		- Produção sustentável

Fonte: Elaboração própria com dados de Ancarani e Di Mauro (2018), Bornert e Musolino (2024), Fel e Griette (2017), Sequeira (2020) e White e Borchers (2016)

Apesar dos diversos fatores que influenciam a tomada de decisão e podem influenciar a repatriação da atividade manufatureira industrial, a principal causa para essa atividade é a transformação das dinâmicas de poder internacionais do contexto pós crise de 2008. A China transformou-se em uma potência de desenvolvimento industrial e manufatureiro e um importante polo tecnológico e inovativo (DIEGUES; ROSELINO, 2020). As dinâmicas de poder afetam a criação e distribuição de valor ao longo das CGVs, além de determinar a margem política que os países têm para impactar a estrutura e gestão de acordos econômicos internacionais (CHANG; ANDREONI, 2020).

Com o crescimento acelerado do desenvolvimento industrial chinês e transformações na estrutura de trabalho, o custo da mão de obra chinesa elevou-se substancialmente. A redução da diferença entre custo de trabalho da China em relação a outros países asiáticos e até mesmo da força de trabalho estadunidense, somada ao aumento dos custos de logística e de manutenção de inventário e de qualidade, reduziram as vantagens comparativas de alguns países que eram destinos clássicos da expansão *offshore* da segunda metade do século XX, como a China (KINKEL, 2014; ANCARANI; DI MAURO, 2018).

A realidade da dinâmica internacional é, no entanto, mais complexa que um algoritmo microeconômico básico para decidir a sede do complexo manufatureiro de determinada indústria. A globalização e as redes e produção globais são fenômenos vivos e mutáveis que inter-relacionam aspectos como a terceirização global e a concentração local de produção. As redes de produção são desenvolvidas com base na racionalização da manufatura flexível com o objetivo da eficiência no curto prazo. As principais empresas de cada setor vão sempre buscar reduzir seus custos de manutenção de inventário e acelerar as cadeias de valor, pressionando os fornecedores e funcionários. As redes de produção globais são fenômenos políticos no sentido de que estratégias corporativas estão incorporadas em regimes de comércio global e políticas industriais e podem se transformar de acordo com a realidade geopolítica e econômica internacional (BUTOLLO; STARITZ, 2022).

2.1.2 *Nearshoring*: uma alternativa para *policymakers*

Enquanto o *reshoring* se define em trazer a produção industrial de volta para o país base da companhia, em geral os Estados Unidos e países da Europa, o *nearshoring* se refere a redirecionar o investimento e as cadeias produtivas para a região da matriz, como o México e o Leste Europeu. Essa tendência vem sendo ampliada porque destinos comuns de países de mão

de obra barata como China e Bangladesh estão experienciando aumento de custos no investimento e na logística. Os ganhos de produtividade pela automação e a proximidade geográfica torna os países da região dos grandes mercados consumidores atraentes. Andersson et al. (2018) trata em aspectos quantitativos o impacto da automação na redução do tempo de produção. Para a fabricação de um par de calças jeans, por exemplo, a automação reduziria o tempo de trabalho entre 40% e 70%. Nesse caso, redirecionar a fonte de abastecimento de recursos da China para o México, por exemplo, seria vantajoso em termos de redução de custos. Uma redução de 70% seria o necessário para o *reshoring* aos Estados Unidos ser economicamente interessante, e essa porcentagem ainda sim seria insuficiente para transferir a produção para a Alemanha, que possui altos salários e custos de operação.

Em muitos casos, países subdesenvolvidos e emergentes possuem vantagens comparativas que atuam como um meio termo entre os benefícios da prática industrial pelo *offshoring* e pelo *reshoring*. Exemplificando, o *nearshoring* envolve mover operações para países vizinhos ou próximos, o que resulta em tempos de transporte reduzidos e uma logística mais simples em comparação ao *offshoring*, onde as distâncias são maiores e podem causar atrasos e custos logísticos elevados. Comparado ao *reshoring*, o *nearshoring* ainda mantém algumas vantagens de custos, como mão de obra mais barata nos países próximos, mas sem a necessidade de trazer tudo de volta ao país de origem, onde os custos tendem a ser mais altos. No caso de empresas estadunidenses, o país alvo costuma ser o México, enquanto empresas europeias podem transferir suas operações para países menores do Leste Europeu, e empresas chinesas para países como Myanmar e Vietnã (BUTOLLO, 2020).

A opção pelo *nearshoring* pode oferecer às empresas um maior controle sobre a produção e operações devido à proximidade física, o que facilita auditorias, inspeções e respostas rápidas a problemas na cadeia de suprimentos, além de maior possibilidade de customização rápida da produção pela proximidade do mercado consumidor (CNI, 2018). Embora o *reshoring* ofereça o controle mais direto, o *nearshoring* mantém um equilíbrio ao permitir maior proximidade em comparação ao *offshoring*, onde distâncias grandes podem complicar o gerenciamento da cadeia de suprimentos. Existe também um ganho de sustentabilidade. Manter a operação manufatureira em um país mais próximo do consumidor final reduz a necessidade de longos transportes marítimos e aéreos, diminuindo a pegada de carbono associada à cadeia de suprimentos, em comparação à produção globalizada multiescalar.

> [...] As regulamentações que consideram toda a cadeia de suprimentos, como a rotulagem de carbono, favorecerão o *reshoring*. Isso se deve ao fato de que o *offshoring* para a demanda doméstica exige o transporte de produtos através dos

> oceanos, muitas vezes a partir de usinas que usam energia gerada por carvão sujo. (GRAY et al., 2013, p. 30, tradução nossa[24])

O *nearshoring* não é, na prática, uma dinâmica recente de transformação das cadeias de valor. A América Latina e o Leste Europeu cumprem papeis importantes nas plantas industriais de empresas norte-americanas e europeias, respectivamente, há muitos anos, combinando vantagens de proximidade e custo de produção (BUTOLLO, 2020). A questão é que essa dinâmica é reforçada pelos fatores e dimensões das tomadas de decisão de repatriação da malha produtiva, explorada no item 2.1.1, e pelo advento da utilização de tecnologias da Indústria 4.0 na produção industrial, que será explorada no item 2.2 deste capítulo .

2.1.3 Contrapontos da relocalização industrial

Existem alguns pontos principais que contrapõem a teoria de tendência ao *reshoring*. O primeiro seria uma resposta ao argumento de que o trabalho barato e não qualificado, um dos incentivos de instalação de bases de empresas transnacionais em países subdesenvolvidos e emergentes, estaria sob risco de automação, e, portanto, tal vantagem comparativa já não seria tão atraente. Em estudo apresentado por Frey e Osborne (2017), é calculado que até 47% dos trabalhos nos Estados Unidos estão sob risco de substituição, e isso inclui também as ocupações qualificadas. No entanto, esses estudos assumem uma implementação perfeita dos equipamentos de automação, sem levar em consideração problemas nos processos de ajuste. É exatamente esse o ponto que Antonio Andreoni (2020) aborda:

> Em países de baixa e média renda, como o Brasil e África do Sul [...] a falta de criação de empregos não se dá tanto pela difusão de tecnologias digitais, e sim pelo resultado de problemas de política e estrutura econômica, incluindo uma desindustrialização prematura, falta de produtividade em estágios chave das cadeias globais de valor, e capacidades produtivas básicas (ANDREONI, 2020, p. 10, tradução nossa[25]).

Outro ponto que vai em desacordo com a lógica do *reshoring* é a incorreta ideia de que as indústrias dos países de alta renda serão os mais afetados pelos efeitos da automação (BUTOLLO, 2020). Um exemplo disso é a China que, segundo dados da International Federation of Robotics (2017), se tornou a maior compradora de equipamento de automação, com uma parcela de 30% das compras em 2016. No país, o progresso em tecnologias de

---

[24] Do original: "[...] *regulations that consider the whole supply chain, such as carbon labeling, will favor reshoring. This is because offshoring for domes- tic demand requires shipping products across oceans, often from plants using power generated by dirty coal."*

[25] No original: "*In low- and middle-income countries, such as Brazil and South Africa […] the lack of job creation is not so much the diffusion of digital technologies as, largely, the result of structural and political economy problems, including premature deindustrialization, lack of productive organizations in key GVC stages, and basic productive capabilities.*"

microprocessamento tornou o equipamento robótico mais acessível, enquanto as reivindicações trabalhistas têm tornado o trabalho mais caro. Butollo (2020) destaca:

> [...] parece contraintuitivo sugerir que uma onda de automação apoiaria tendências em direção ao reshoring dado que automações de recuperação em países emergentes também poderiam ter o efeito de reduzir os custos de trabalho unitário de produtores se a automação intensificadora de produtividade estiver implantada (BUTOLLO, 2020, p. 7, tradução nossa[26]).

No caso da China em específico, embora o uso de tecnologias de produção digital esteja aumentando, tais tecnologias ainda estão concentradas em algumas cadeias de valor setoriais, e a automação completa que de fato mudaria o paradigma da empregabilidade industrial está longe de ser difundida (ANDREONI, 2020). As políticas industriais do país, no entanto, já destacam um início em conectividade intersetorial de cadeias de valor utilizando tecnologias de produção digital.

Um exemplo marcante do estado vigente da automação no ambiente industrial como contraponto para a política do *reshoring*, é o caso das *Speedfactories,* fábricas da Adidas que tinham a premissa de serem altamente customizáveis, especializadas, automatizadas, e produzidas nos países centrais, próximos ao seu público alvo. (BUTOLLO, 2020; GALLUCCIO, 2022). A primeira fábrica foi inaugurada em 2015 em Ansbach, na Alemanha, e a segunda em 2017 em Atlanta, nos Estados Unidos. Os motivos que levaram a Adidas à tentativa de utilização da Indústria 4.0 em suas fábricas locais foram vários. Os principais giravam em torno de reduzir a dependência da companhia de fornecedores asiáticos, reduzir o tempo de entrega dos recursos, a proximidade com os maiores mercados do mundo e a possibilidade de atender a demanda dos usuários por meio da customização dos produtos. No entanto, em 2019 foi anunciado o encerramento das atividades dessas duas fábricas, e suas operações foram realocadas para dois dos fornecedores da Adidas na Ásia. Os motivos do fracasso das Speedfactories foram: (i) a impossibilidade técnica e tecnológica de manter uma fábrica completamente automatizada e sem trabalho humano[27] ; (ii) a falta de conhecimento técnico, que resultou em elevação de custos com parcerias de terceirizadas; e (iii) o rápido abandono do aspecto customizável dos produtos, conforme havia sido planejado, o que levou os consumidores a balizar seus interesses no projeto, pois estariam pagando mais caro pelos produtos, simplesmente por estarem sendo fabricados de maneira inovadora. Em outras

[26] No original: "*It seems counterintuitive to suggest that a surge of automation would support tendencies towards reshoring given that catch-up automation in emerging economies could also have the effect of lowering unit labor costs of producers if productivity-enhancing automation equipment is deployed*."

[27] Esse problema é decorrência direta da opção pela manutenção da mão de obra nos EUA e Alemanha. Como a mão de obra dos países asiáticos é mais barata, a escassez de trabalho humano não seria um empecilho.

palavras, na tentativa de reduzir a dependência de fornecedores asiáticos, a Adidas acabou se privando de muitos pontos positivos da produção globalizada, como a mão de obra barata e a expertise desses fabricantes (GALLUCCIO, 2022).

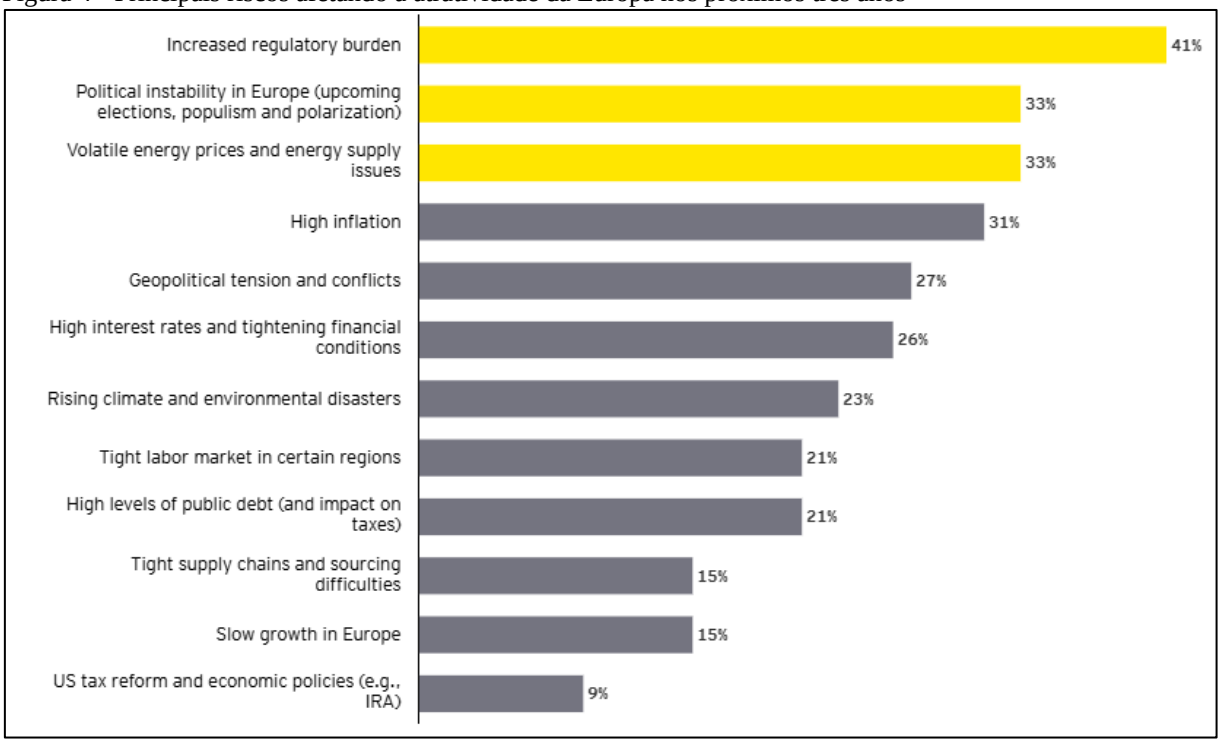
Na seção 2.2 deste capítulo serão exploradas as relações das tecnologias da I4.0 com as possibilidades de *reshoring*. No entanto, alguns estudos apontam características da digitalização e automatização que podem facilitar o *offshoring* das operações manufatureiras e a terceirização de tarefas. Sturgeon (2017) argumenta que a capacidade de empresas líderes de fragmentar as cadeias de valor é aprimorada com as novas tecnologias de digitalização. Isso porque a informatização aperfeiçoa a codificação e transferência de dados em tempo real, o que facilita o controle de qualidade e processos das etapas da cadeia de valor mesmo à distância. Somado a isso, novos modelos de negócio como as multinacionais digitais e as economias de plataforma, exploradas no capítulo 1 desta monografia, promovem as funções da modularização e da padronização do complexo industrial. A modularização se define como o processo de repartir operações industriais complexas em unidades (ou módulos) em unidades menores, autônomas e intercambiáveis. Cada módulo pode executar uma função ou operação distinta de forma independente. Isso facilita o projeto, o gerenciamento e a modificação de partes específicas do sistema sem afetar o todo. Os módulos geralmente são padronizados, o que significa que podem ser projetados para se encaixar em diferentes sistemas ou ser reutilizados em diferentes produtos ou processos. Essa padronização reduz os custos, permitindo economias de escala e tornando o processo de projeto e fabricação mais eficiente. Essa dinâmica acelera o processo de projeto e produção, permitindo que as empresas coloquem os produtos no mercado mais rapidamente. Ao usar módulos pré-projetados e pré-testados, as empresas podem reduzir o tempo necessário para o desenvolvimento e a fabricação.

As dificuldades e custos logísticos, fatores que inclinam os tomadores de decisão empresariais ao *reshoring*, também podem ser contornados, em certo modo, pela integração e avanço tecnológico. Butollo (2020) apresenta o conceito da Logística 4.0, que envolve o uso de *big data*, Internet das Coisas (IoT), inteligência artificial (IA) e *machine learning* para melhorar o planejamento, o rastreamento e a visibilidade da cadeia de suprimentos. Isso permite que as empresas tenham um controle muito maior sobre suas operações internacionais, minimizando os riscos de interrupções e garantindo entregas mais rápidas e precisas. Com maior visibilidade e controle da cadeia de suprimentos, as empresas podem mitigar muitos dos desafios que impulsionam o *reshoring*, como atrasos no transporte e problemas logísticos em geral. Tecnologias como maquinários autônomos, drones, e armazéns automatizados tornam a movimentação e o armazenamento de mercadorias muito mais eficiente e confiável. Isso reduz

os custos de logística associados à produção *offshore*, tornando mais atraente manter operações em países de baixo custo de produção. A digitalização das operações logísticas permite um planejamento de rotas mais eficiente, otimização de estoques e redução de desperdícios. Esses ganhos de eficiência em alguns casos compensam os custos adicionais que surgem ao operar em regiões distantes.

A figura 4 apresenta os principais riscos afetando a atratividade da Europa em IDE nos próximos três anos, com base na opinião de 500 investidores entrevistados. As principais causas encontradas são o aumento da carga regulatória, a instabilidade e polarização política e os preços voláteis de energia e deficiências em seu fornecimento. Outras razões incluem inflação alta, tensões geopolíticas, altas taxas de juros.

Figura 4 - Principais riscos afetando a atratividade da Europa nos próximos três anos



Fonte: Teigland, Bax e Lhermitte (2024)

Em determinados setores, os incentivos fiscais e quantitativos oferecidos por países em desenvolvimento, em especial asiáticos, sobrepõem benefícios e possibilidades qualitativas que o *reshoring* poderia compensar, tornando esta prática não-atraente ou não-aplicável em termos práticos.

2.2 Retorno do protecionismo e nacionalismo industrial

Embora a discussão central desta monografia traga maior enfoque para políticas empresariais que impactam em um contexto mais individual e setorial as dinâmicas de repatriação de indústrias e fornecedores, é de suma importância considerar também as relações macroeconômicas, geopolíticas e internacionais que podem ocasionar este tipo de dinamismo. Uma combinação de fatores econômicos, como a entrada da China na Organização Mundial do Comércio em 2001 e crise financeira de 2008, políticos como intervenções estatais de incentivo à corrida tecnológica, e geopolíticos como a rivalidade econômico-comercial entre EUA e China causaram um fenômeno internacional entre as grandes potências capitalistas de retorno a práticas protecionistas. Esse é um fenômeno multifacetado e complexo, mas que certamente apresenta impactos na cooperação internacional e dinâmicas industriais (DABROWSKI, 2024).

O protecionismo pode gerar incerteza sobre as condições de comércio e investimento, levando as empresas a hesitar em tomar decisões de *reshoring*. Políticas protecionistas podem favorecer algumas empresas, mas prejudicar outras, criando uma situação em que muitas empresas preferem manter operações diversificadas geograficamente. Empresas mais sensíveis aos custos de mão de obra em suas subsidiárias estrangeiras são mais propensas a realizar o *reshoring*. Se os custos de mão de obra em países estrangeiros aumentarem ou se tornarem menos atrativos, as empresas podem considerar a repatriação de atividades para seus países de origem (TEMOURI, 2023). O aumento das tensões geopolíticas pode motivar o *reshoring* com o intuito de priorizar a segurança e a estabilidade sobre a eficiência em termos de custos. No entanto, o chamado "*friend-shoring*", ou seja, a realocação da produção para países considerados aliados, pode acarretar perdas econômicas significativas, como comenta Dabrowski (2024, p. 16, tradução nossa[28]):

> A inovação e o potencial de crescimento da produtividade [...] dependem principalmente da livre circulação internacional de tecnologias, capital, investimento e pessoas e da cooperação irrestrita entre universidades e outros centros de pesquisa. Infelizmente, esse movimento já foi restringido, especialmente (mas não apenas) entre os EUA e a China.

Embora o protecionismo represente um desafio às bases da globalização, ele não implica uma reversão completa desse fenômeno. Em vez disso, o reshoring surge como um ajuste estratégico às condições econômicas e políticas em transformação. As empresas estão adaptando suas operações para equilibrar custos e riscos, enquanto as economias nacionais

[28] No original: "*Innovation and potential productivity growth [...] depend primarily on the free international movement of technologies, capital, investment, and people and unrestricted cooperation between universities and other research centers. Unfortunately, this movement has already been restricted, especially (but not only) between the US and China.*"

buscam fortalecer suas indústrias frente às incertezas globais, reforçando a necessidade de estratégias industriais integradas e sustentáveis.

2.3 Resiliência das Cadeias Globais de Valor e excesso de dependência

O modelo *offshore*, caracterizado pela realocação de etapas produtivas para países de baixo custo, como a China, tem sido amplamente adotado por empresas multinacionais devido às vantagens de escala e redução de custos operacionais. Contudo, essa estratégia apresenta fragilidades significativas quando há concentração excessiva da produção em um único país. Um exemplo é a dependência exacerbada das empresas em relação às condições econômicas, políticas e legais desse país, o que pode gerar vulnerabilidades consideráveis diante de eventos disruptivos. Essa concentração também vulnerabiliza as etapas produtivas a uma diversidade de riscos, expondo cadeias globais de valor a impactos negativos em situações de instabilidade.

A vulnerabilidade climática e ambiental é uma das maiores fragilidades do modelo *offshore* concentrado. A China, por exemplo, enfrenta uma frequência crescente de desastres naturais, como enchentes, tufões e ondas de calor intensas, agravados pelas mudanças climáticas. Esses eventos podem interromper drasticamente as operações industriais, causar atrasos na logística e impactar a disponibilidade de insumos críticos, comprometendo o fornecimento global. Além disso, a intensa industrialização em regiões específicas do país tem gerado problemas ambientais severos, como poluição do ar e da água, levando a restrições governamentais para mitigar esses efeitos, o que pode aumentar os custos e dificultar a operação de empresas dependentes dessa infraestrutura.

Outro fator crítico são as mudanças nas legislações trabalhistas e regulatórias. A dependência de um país como a China, que possui um sistema legal e político centralizado, pode ser problemática quando há alterações abruptas em políticas de exportação, controle de capital ou regulamentações ambientais. Um exemplo recente são as restrições de energia impostas a indústrias intensivas em consumo energético em 2021, que causaram interrupções na produção de setores como semicondutores e eletrônicos. Esses eventos demonstram como políticas domésticas de um país central na cadeia global de valor podem reverberar de maneira significativa nas economias dependentes.

A fragilidade do modelo offshore concentrado também se reflete em sua incapacidade de lidar com interrupções geopolíticas e comerciais. Tensões como a guerra comercial entre Estados Unidos e China evidenciam os riscos de dependência de cadeias de suprimentos concentradas em um país específico. Medidas como tarifas de importação, restrições comerciais e até boicotes internacionais impactam diretamente os custos e a competitividade das empresas

que operam sob esse modelo. Em resposta a essas vulnerabilidades, países centrais e empresas podem explorar alternativas como o *reshoring* e o *nearshoring*, buscando uma maior resiliência e diversificação das cadeias globais de valor para mitigar riscos e garantir a continuidade dos negócios.

2.4 Como as tecnologias da Indústria 4.0 impactam políticas de *reshoring*

No primeiro capítulo desta monografia foram exploradas diversas tecnologias que compõem os pilares da Indústria 4.0 em um ambiente de digitalização do setor manufatureiro. Para compreender como tais tecnologias impactam as políticas de localização do campo industrial das principais empresas internacionais, precisa-se separar, no primeiro momento, as principais estratégias de negócio do *reshoring*. Ancarani e Di Mauro (2018) destacam três estratégias-base, que servirão de base para o estudo do impacto da automação no contexto industrial.

A primeira estratégia é o *reshoring* orientado pelo custo. Conforme exposto no item 2.1.1 deste trabalho, fatores como a elevação do custo de mão de obra em países como a China reduziu a vantagem comparativa de alguns destinos clássicos da produção manufatureira internacional. Nesse contexto, algumas tecnologias de digitalização e automação, em especial a instauração da robótica avançada, podem tornar vantajoso e sustentável o retorno da indústria a países de alto custo no médio prazo. Os ganhos relativos da adoção da robótica neste tipo de configuração estratégica do *reshoring* estaria embasado na redução da quantidade de mão de obra (fator trabalho relativo) no processo industrial, do incremento potencial em produtividade, e da diminuição de erros e da necessidade de retrabalho. A manutenção preditiva com base em IA e *machine learning* poderia auxiliar a prever falhas em equipamentos, o que reduz custos de manutenção e tempo de inatividade.

A segunda estratégia é o *reshoring* orientado pela flexibilidade. A capacidade de customização em larga escala torna a produção flexível e variável, em cadeias de valor mais curtas, uma vantagem para os países-sede das empresas líderes, por estarem próximos à grande massa do seu mercado consumidor. Reduzindo os custos da produção flexível e possibilitando a variabilidade de bens a robótica também pode ser vantajosa para empresas com estratégia de *reshoring*. Tecnologias como a manufatura aditiva (impressão 3D) permitem maior customização e resposta rápida às necessidades de produção de itens diferenciados, enquanto o *big data* e a análise avançada preveem flutuações de demanda e ajustam rapidamente a produção. No primeiro capítulo deste trabalho foram apresentadas as *smart factories*, ambientes que integram sistemas físicos com computação e comunicação, permitindo que a fábrica

responda de forma autônoma a mudanças. Esse tipo de estabelecimento seria uma configuração industrial muito vantajosa para a estratégia de *reshoring* orientado pela flexibilização da produção, uma vez que possibilita a customização a custo baixo e a pronta-entrega.

A terceira e última estratégia-base é o *reshoring* orientado pela qualidade. Quando uma firma migra para uma linha de produção mais sofisticada, com produtos mais complexos, que demanda um valor adicionado e um conhecimento mais refinado na cadeia operacional, realocar a base manufatureira para o país central é uma alternativa geralmente vantajosa. O aprimoramento de produtos não apenas aumenta o valor agregado das operações, mas também implica que as operações têm maior probabilidade de serem acopladas a outras funções, como P&D e marketing, exigindo, portanto, a troca de informações e a colaboração entre as funções. Nas palavras de Ancarani e Di Mauro (2017, p. 89, tradução nossa[29]): "[no caso de busca pela elevação da qualidade da produção] o *reshoring* pode representar a solução racional, devido aos sistemas de desenvolvimento de produção acoplados e à interdependência entre comprador e fornecedor no desenvolvimento de novos produtos". As empresas integradas nesta estratégia são beneficiadas, em especial, pela manufatura aditiva e pelo desenvolvimento de sistemas cyber-físicos. Outras tecnologias que podem impactar positivamente o complexo manufatureiro neste tipo de estratégia é a inteligência artificial para controle de qualidade, aplicada para identificar defeitos e otimizar processos de produção, além de sistemas de visão computacional e inspeção automatizada que realizam inspeções contínuas e detalhadas durante a produção, garantindo altos padrões de qualidade. Podem ser utilizados também sensores avançados e IoT para monitoramento constante das condições de produção para assegurar qualidade, e a implementação de *digital twins*, ou gêmeos digitais, representações virtuais de objetos físicos, sistemas, processos ou instalações operacionais que realizam simulações precisas dos processos de produção para identificar e corrigir falhas antes que afetem a qualidade do produto final. A somatória destas tecnologias permite a integração efetiva de design, desenvolvimento e produção.

Evidências empíricas relatam que empresas grandes de indústrias de alta tecnologia apresentam uma maior tendência ao *reshoring* (RAZA et al., 2021). A manufatura de alto valor e intensiva em tecnologia requer uma infraestrutura sofisticada, trabalhadores especializados, proteções de propriedade intelectual e cadeias de valor integradas. Este tipo de especialização da produção é mais eficiente e mais barato de ser alcançado por meio da produção doméstica

[29] Do original: "*reshoring may represent the rational solution, because of coupled production-development systems and buyer-supplier interdependence in new product development*"

(BILBAO-UBILLOS et al., 2024). Apesar da proeminência de setores de alto valor agregado, a dinâmica do *backshoring* traz vantagens em outros setores, como destaca James (2018):

> [...] um *onshoring* da produção, em que os processos que antes eram transferidos para centros de produção com baixos salários são trazidos para casa e executados com tecnologia que economiza mão de obra (por exemplo, robotização). A produção mais próxima dos consumidores finais e a redução das cadeias de suprimentos permitem uma fabricação mais rápida e reativa: Em alguns casos (vestuário e têxtil), isso é desejável porque é mais fácil reagir a mudanças rápidas na moda ou no gosto do consumidor (JAMES, 2018, p. 221, tradução nossa[30]).

2.5 Estimativas dos Impactos Setoriais da Indústria 4.0

A Indústria 4.0 representa uma transformação fundamental nos processos produtivos, marcada pela integração de tecnologias avançadas como automação, inteligência artificial, internet das coisas (IoT) e big data. Esse movimento está remodelando a forma como as empresas operam, trazendo um impacto profundo em diferentes setores da indústria. À medida que as empresas adotam tecnologias digitais, a produção torna-se mais flexível, eficiente e personalizada, permitindo uma resposta mais ágil às demandas de mercado. Contudo, esse avanço também apresenta desafios consideráveis, como a necessidade de novas competências profissionais, o redesenho de cadeias de suprimentos e questões relacionadas à segurança de dados.

> Uma profunda transformação digital está acontecendo nas principais empresas industriais e de manufatura do mundo. [...] As empresas estão digitalizando funções essenciais de suas cadeias de valor verticais internas e também de seus parceiros horizontais ao longo da cadeia de suprimentos. Além disso, elas estão aprimorando seu portfólio de produtos com funcionalidades digitais e lançando serviços inovadores com base em dados (ALVES; VENDRAMINI, 2017, p.3).

No item 1.3 do primeiro capítulo desta monografia, foram apresentados os nove pilares da I4.0. Entendendo que cada tecnologia pode gerar impactos diferentes sobre os mais diversos setores industriais, deve ser realizada uma análise setorial, mensurando: (i) quais setores têm maior tendência para a implementação de tecnologias da I4.0 na sua operação manufatureira; (ii) quais são as tecnologias mais propícias de serem adotadas por cada setor industrial; e (iii) quais setores, com base nas tecnologias de I4.0 aplicadas, são mais suscetíveis ao *reshoring* de suas operações.

---

[30] Do original: "*onshoring of production, where processes that were formerly offshored to low-wage production centers are brought home and carried out with labor-saving technology (e.g., robotization). Producing nearer to ultimate consumers and shortening supply chains allows quicker and more reactive manufacturing: In some cases (clothing and textiles), this is desirable because it is easier to respond to rapid shifts in fashion or consumer taste.*"

2.5.1 Setores industriais com maior aderência à Indústria 4.0

Os conceitos e as tecnologias da Indústria 4.0 podem ser aplicados em todos os tipos de empresas industriais, incluindo manufatura discreta e de processos, bem como petróleo e gás, mineração e outros segmentos. Todos os setores industriais serão impactados de alguma maneira pela I4.0, alguns em graus maiores que outros. A natureza da transição para a I4.0 será diferente de acordo com os tipos específicos de tecnologia que estão sendo adotados, bem como com a infraestrutura e as competências existentes nas organizações.

É possível traçar um paralelo claro entre o grau de investimentos em P&D de grandes empresas, e a sua sensibilidade à adoção de novas tecnologias industriais, em especial em relação às principais tecnologias da I4.0 como automação, inteligência artificial, robótica avançada, internet das coisas (IoT) e big data. Investir em P&D é um sinal claro de que uma empresa ou setor está comprometido em desenvolver ou integrar essas novas tecnologias. Quanto mais uma indústria investe em P&D, maior a probabilidade de estar explorando e adotando soluções inovadoras relacionadas à Indústria 4.0. A transição para a Indústria 4.0 envolve não apenas a digitalização de processos existentes, mas também a criação de novos produtos, serviços e modelos de negócio. Investimentos em pesquisa e desenvolvimento permitem às empresas desenvolver soluções customizadas para otimizar suas operações e melhorar sua competitividade, o que é essencial para acompanhar essa transformação tecnológica.

A Tabela 1 abaixo apresenta os gastos em P&D nos principais setores da manufatura industrial de Estados Unidos, China e Alemanha entre 2019 e 2021, a partir da base de dados *Analytical Business Enterprise Research and Development* da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE). Esse banco de dados incorpora uma série de estimativas que se baseiam e ampliam os envios nacionais de dados de pesquisa e desenvolvimento de empresas por setor.

Tabela 1 - Investimentos em P&D (em milhões de dólares) nos principais setores da manufatura nos EUA, China e Alemanha

Setor de manufatura	2019	2020	2021	Somatória
Produtos alimentícios e bebidas	$19.790	$20.883	$22.861	$63.535
Produtos têxteis	$12.266	$11.649	$12.356	$36.272
Produtos derivados de madeira, plástico e papel	$9.459	$9.272	$10.731	$29.463
Químicos e farmacêuticos	$188.103	$195.021	$217.511	$600.636
Metalurgia	$51.093	$50.959	$59.648	$161.702
Produtos eletrônicos	$209.223	$241.511	$270.857	$721.592
Automobilística e aeronáutica	$196.056	$207.628	$226.057	$629.742
Manufatura de mobílias, joias, instrumentos musicais, brinquedos etc.	$27.401	$28.077	$32.757	$88.236
Outras manufaturas	$24.397	$24.611	$29.052	$78.061

Fonte: Elaboração própria com base em dados da OCDE (2024)

A indústria de produtos eletrônicos, que inclui a manufatura de computadores, *smartphones*, componentes elétricos, equipamentos de comunicação etc. é, naturalmente, uma referência global em pesquisa de inovação. Isso porque, por definição, a I4.0 é a integração entre o chão de fábrica manufatureiro e a digitalização, por meio de Tecnologias de Informação e Comunicação (TICs) avançadas (BMBF, 2006; DALENOGARE et al, 2018). As grandes empresas de tecnologia, como Amazon, Google, Microsoft, Apple e Meta, as chamadas *Big Techs*, estão incorporando tecnologias de inovação industrial de várias maneiras, tanto em suas operações internas quanto nas soluções que oferecem a outras indústrias. Essas empresas estão na vanguarda da transformação digital e têm desempenhado um papel importante na implementação e desenvolvimento de tecnologias associadas à Indústria 4.0. As principais *big techs* têm focado grande parte de seus investimentos no desenvolvimento da oferta de uma solução de produtos e serviços que sejam integrados e ofereçam ao cliente uma integração de diversas tecnologias inteligentes no dia-a-dia, por meio da Internet das Coisas (IoT). É o caso de serviços como o *Amazon AWS IoT* e o *Azure IoT Hub*. A IoT pode também ter aplicações industriais, recebendo o nome de Internet das Coisas Industrial (IIoT), por meio da conexão de máquinas, sensores, sistemas e outros ativos industriais em uma rede digital, permitindo o monitoramento, coleta de dados e controle remoto em tempo real de processos industriais. O principal objetivo da IIoT é melhorar a eficiência, reduzir custos operacionais e otimizar a produção, além de aumentar a automação e a segurança nas operações industriais.

> A IIoT também permite às firmas reagir a flutuações da demanda em tempo real, otimizar os estoques, incrementar eficiência em processos por meio de um maior controle de cada etapa produtiva, reduzir o consumo de recursos e energia e prover

> manutenção preventiva no tempo adequado [...] (HUTCHINSON, 2022, p. 273, tradução nossa[31]).

O setor automobilístico é referência global em inovação industrial desde o início do século XX (BORTOLINI et al, 2022). A indústria automotiva é altamente competitiva, e a inovação tecnológica é essencial para se destacar em um mercado saturado. Com a dinâmica concorrencial cada vez mais acirrada, as empresas precisam adotar tecnologias da I4.0 para reduzir custos, otimizar processos e melhorar a qualidade dos produtos. Consumidores estão cada vez mais exigentes e esperam que seus veículos possuam tecnologias modernas e recursos avançados, como assistentes de direção, conectividade com smartphones, sistemas de entretenimento inteligentes, e até mesmo condução autônoma. A I4.0 permite a personalização em massa, oferecendo ao cliente a possibilidade de customizar o carro de acordo com suas preferências. As tecnologias digitais permitem que as montadoras ajustem rapidamente a produção para atender a novas preferências e tendências de mercado, adaptando-se à demanda por veículos elétricos, conectados e sustentáveis. Tarefas repetitivas e não ergonômicas são realizadas com a ajuda da robótica colaborativa, permitindo que operadores e robôs convivam na mesma área de trabalho. Por outro lado, a visão computacional é usada nesse campo e em outros para a detecção de defeitos durante o início do processo de fabricação. Isso permite a redução de custos por meio da detecção de falhas antes que o produto adquira mais valor na cadeia de produção. Grandes montadoras como a BMW (SCHINDLER, 2020), Audi (EVANS, 2024) e Renault (KROON; BOER; SHAHANI; 2024) são referências globais de implementação da inovação e digitalização em suas operações. As fábricas da BMW e da Renault fazem parte, inclusive, da rede *Global Lighthouse Network* (GLN), uma iniciativa do Fórum Econômico Mundial que reúne as indústrias referência em tecnologia 4.0 em diversos setores. A GLN é um conjunto de 172 fábricas consideradas as mais avançadas do mundo, servindo como um "farol" para outros complexos industriais. O objetivo da GLN é transformar as cadeias globais de valor e promover, dentro do ambiente manufatureiro, a redução de trabalho, a redução de desperdício, e a redução de preocupações[32]. O Brasil abriga quatro fábricas "faróis" dentro da GLN: a fábrica da Renault em Curitiba, a da Flex em Sorocaba, da Unilever em Indaiatuba e da MODEC no Rio de Janeiro. Dentre as empresas faróis, a indústria eletrônica detém a maior parcela (17,3%), seguido da indústria de eletrodomésticos (11,5%) e automotiva (7,9%).

---

[31] Do original: "*The IIoT also enables firms to react to the fluctuations of demand in real time, optimize inventories, increase efficiency in the process through a better control of each production stage, reduce consumption of resources and energy and provide just-in-time preventive mainten-ance [...]*"

[32] Redução dos três "Ws": *"work*", "*waste*" e "*worryness*".

Além das melhorias e da economia nos processos de produção, o automóvel em si também está começando a introduzir as tecnologias da Indústria 4.0.

> [...] atualmente, as montadoras buscam alternativas para tirar proveito do fato de que, no futuro, o carro poderá não ser o único foco do negócio e crescerá a importância de que os dados do veículo, do consumidor e de geolocalização sejam trabalhados de maneira inovadora para gerar novos fluxos de receita para a indústria (CGEE, 2022, p. 69).

Os veículos estão se tornando plataformas digitais móveis, capazes de se conectar com outros veículos, infraestruturas de cidade inteligente e dispositivos pessoais. Tecnologias de conectividade possibilitam monitoramento remoto, diagnósticos preditivos e atualizações de software à distância, garantindo uma experiência superior para o cliente e permitindo que o veículo permaneça atualizado ao longo de sua vida útil. Isso também contribui para a criação de novos modelos de negócios, como o de veículos autônomos.

O setor aeronáutico enfrenta uma intensa pressão por inovação, segurança e eficiência operacional, o que torna o investimento em tecnologias industriais avançadas essencial. Em um mercado altamente competitivo e regulado, essas tecnologias ajudam as empresas a atender a padrões rígidos e responder com rapidez a demandas de personalização e inovação, garantindo maior competitividade e excelência operacional no setor. Os principais objetivos do investimento em inovação industrial nesse setor se resumem na busca pela redução de custos produtivos, aceleração do ritmo de produção para corresponder às demandas das companhias aéreas, manutenção da crescente complexidade de sistemas e elementos produtivos, e pela busca pela manufatura de produtos, partes e peças de qualidade que reduzam os riscos e atinjam os protocolos das agências de fiscalização e controle (GUYON et al, 2019).

As indústrias química, petroquímica e farmacêutica são alguns dos setores mais avançados na aplicação de novas tecnologias que contribuem para transformações profundas na forma de produzir das empresas que atuam na área. Estes setores aprofundam conceitos de biotecnologia, nanotecnologia e biorrobótica para a criação de novos materiais, dispositivos e soluções biotecnológicas. A nanotecnologia permite o desenvolvimento de novos materiais e componentes em uma escala microscópica, a fim de melhorar a durabilidade, a resistência e a funcionalidade de produtos industriais. A biorrobótica é focada na criação de robôs que imitam funções biológicas ou interagem diretamente com sistemas biológicos, por meio de robôs cirúrgicos e dispositivos assistivos que cooperam com humanos de maneira segura.

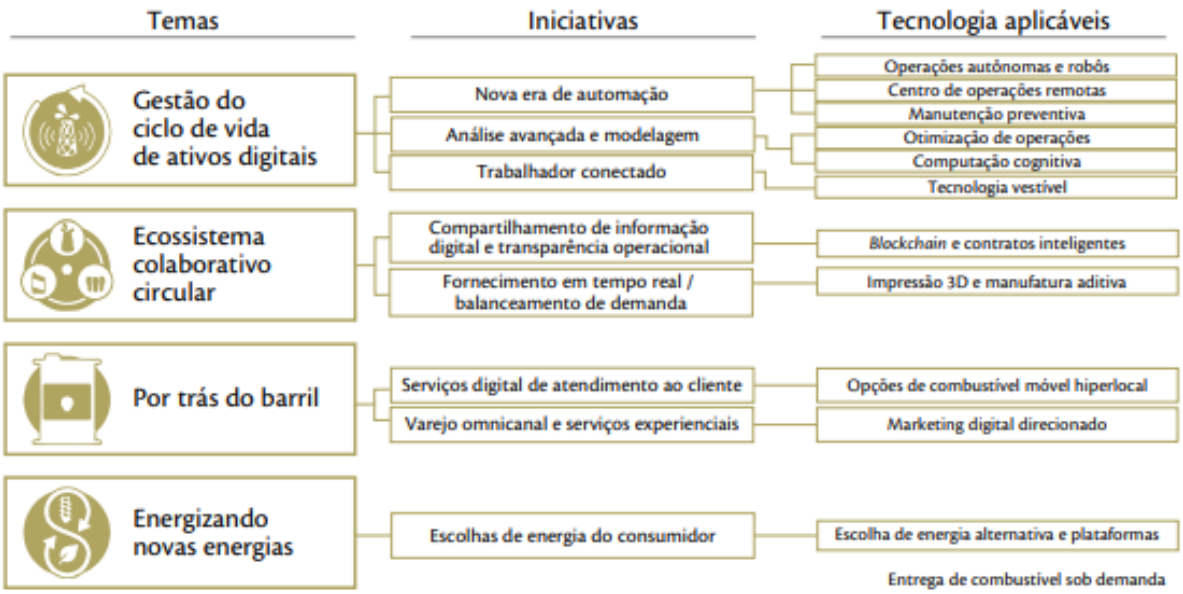
Além disso, há o desenvolvimento de uma vertente da IoT para fins de especialização no ramo farmacêutico e de saúde, a chamada Internet Médica das Coisas (IoMT).

> [...] a Internet Médica das Coisas (IoMT) consiste em um serviço de saúde de aplicação de tecnologias IoT e prevê uma rede de dispositivos conectados que

> detectam dados vitais em tempo real. O florescimento da IoMT foi possibilitado pelo desenvolvimento de sistemas baseados em sensores sem fio, nanotecnologia e miniaturização. Agora, é possível juntar os pontos entre dispositivos digitais pessoais, dispositivos médicos conectados, implantes e outros sensores para que estes coletem, processem e analisem dados (CGEE, 2022, p. 73).

Na indústria de petróleo e gás há expectativa de que os sistemas de digitalização industrial reduzam significativamente o custo por barril da exploração futura de recursos de hidrocarbonetos. A figura 5, extraída de um relatório do Fórum Econômico Mundial (WEF, 2017) apresenta quatro iniciativas centrais para a transformação digital da indústria de petróleo e gás. O primeiro aspecto é a gestão do ciclo de vida dos ativos digitais, que surge da união entre novas tecnologias digitais e análises orientadas por dados, transformando as operações, aumentando a agilidade e melhorando a tomada de decisões estratégicas, o que resulta em novos modelos de negócio. O segundo é o ecossistema colaborativo circular, baseado na ideia de que o uso de plataformas digitais integradas fortalece a colaboração entre os participantes, ajudando a acelerar a inovação, reduzir custos e proporcionar transparência nas operações. O terceiro conceito é o de ir além do barril, em que modelos inovadores de engajamento com o cliente oferecem flexibilidade e uma experiência personalizada, criando novas oportunidades de receita para as operadoras de petróleo e gás e novos serviços para os consumidores. Já o quarto elemento é a energização de novas fontes de energia, que pressupõe que a digitalização dos sistemas energéticos promove o desenvolvimento de novas fontes e transportadores de energia, além de apoiar modelos inovadores de otimização e comercialização de energia.

Figura 5 - Iniciativas digitais na indústria de petróleo e gás

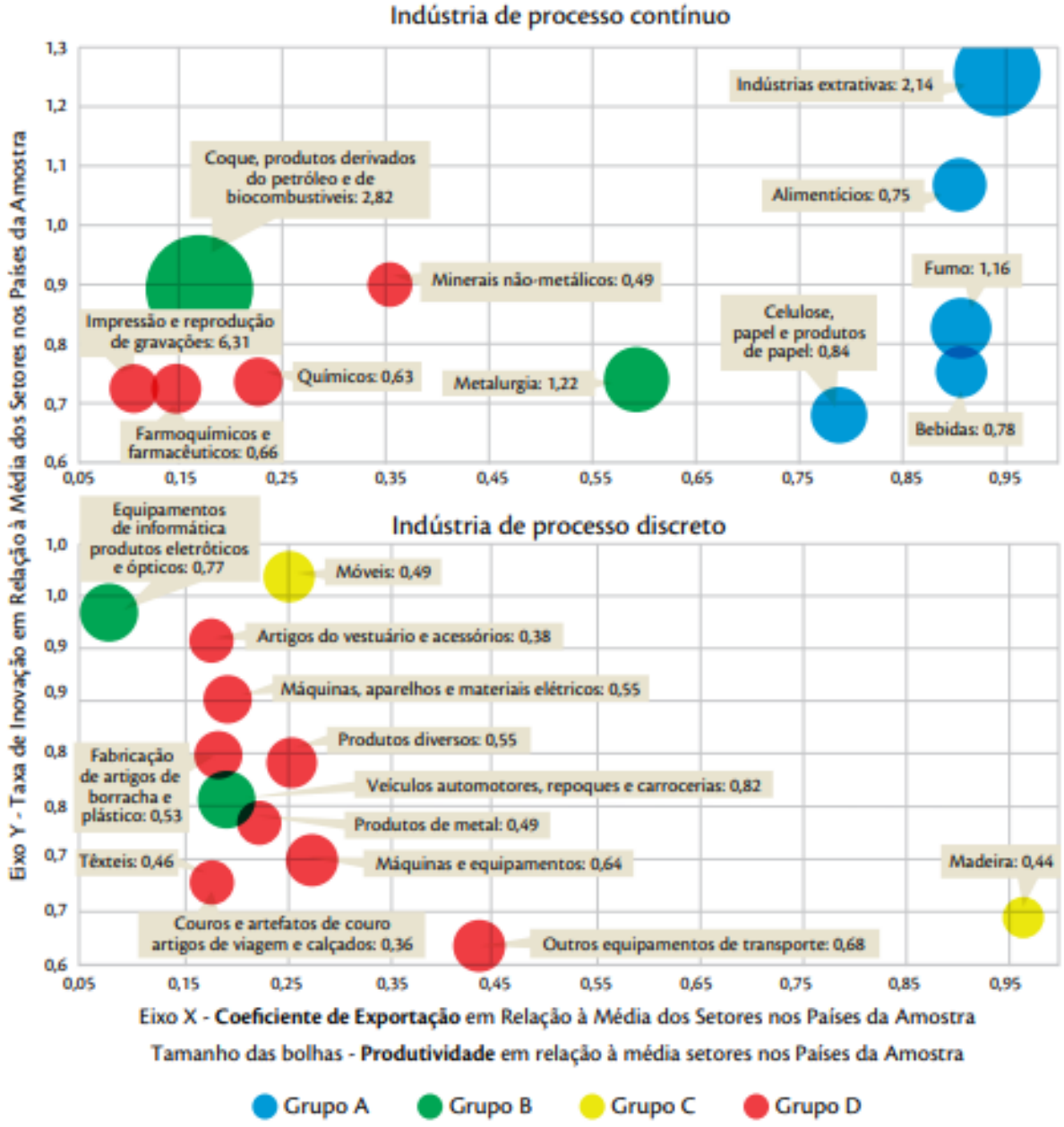


Fonte: WEF (2017)

Alguns outros setores industriais também merecem destaque por sua capacidade de inovação e sensibilidade à I4.0. A indústria têxtil e de vestuário é especialmente interessada na possibilidade de elevada customização que uma fábrica integrada em um sistema cyber-físico próximo ao mercado consumidor possui, especialmente pelo rápido contato entre demanda e produção. “Devido à agilidade do mercado da moda e do uso intenso das tecnologias de informação e de comunicação, os consumidores do setor já apresentam uma maior abertura aos conceitos de individualização e personalização” (CGEE, 2022, p. 75). A indústria de alimentos e bebidas se interessa pelo investimento em inovação industrial para controle da inatividade das cadeias de valor, redução de custos operacionais, e maior possibilidade de sustentabilidade do processo produtivo. A integração digital permitiria um maior controle e transparência da empresa em todas as etapas da produção, desde o plantio da agroindústria até a distribuição aos consumidores finais.

A figura 6 abaixo foi extraída de um relatório da Confederação Nacional da Indústria (CNI, 2017) e apresenta um gráfico que mede a adesão de diversos setores industriais no Brasil com base em diversos indicadores. O eixo X representa o coeficiente de exportação na indústria no Brasil em relação à média dos setores em outros países selecionados de uma amostra; o eixo Y representa a taxa de inovação em relação à média dos setores nesses outros países, e o tamanho das bolhas representa a produtividade do setor em relação à média da amostra.

Figura 6 - Taxa de Inovação, produtividade e taxa de exportação dos principais setores no Brasil



Fonte: CNI (2017)

A análise do gráfico permite a separação dos principais setores industriais brasileiros em quatro grupos, com diferentes perspectivas de adoção de tecnologias da I4.0 e competitividade. O grupo A, das bolhas azuis, diz respeito aos setores industriais com o maior potencial para serem líderes na adoção de tecnologias de inovação e digitalização industrial, com maior perspectiva de produtividade e exportação. O grupo B, das bolhas verdes, apresenta, em geral, alta produtividade média relativa, mas com baixos coeficientes de exportação. Esses setores sustentam a sua posição no mercado interno, mas ainda assim apresentam perspectivas de vanguarda no quesito de inovação industrial. Os setores do grupo C, das bolhas amarelas,

tendem a ter a produtividade menos acelerada, mas com competitividade externa devido a outras vantagens ,como disponibilidade de recursos naturais. Estes setores podem adotar tecnologias de digitalização industrial de maneira gradual e estratégica, devido à vantagem comparativa estabelecida no mercado. Finalmente, o grupo D, das bolhas vermelhas, apresenta os setores que, no contexto brasileiro, mas devem sofrer com a nova onda tecnológica. São os setores que apresentam produtividade e coeficiente de exportação relativamente baixos. No longo prazo, as empresas desses setores tendem a ser atingidas por uma concorrência internacional mais expressiva, de empresas que investem mais em P&D. É o caso de setores como o químico, farmacêutico, eletrônico e têxtil que, como já apresentado, possuem uma forte onda de investimento em inovação industrial no contexto internacional dos países mais representativos dessas indústrias.

2.5.2 Principal conjunto de tecnologias do processo de digitalização de cada setor

A adoção de tecnologias da Indústria 4.0 é essencial para que empresas dos principais setores industriais mantenham sua competitividade, eficiência e capacidade de inovação em um cenário global cada vez mais dinâmico. Estudos da McKinsey & Company (HAGEMANN; OLIVEIRA, 2018) apontam que as empresas à frente na adoção dos elementos da chamada Indústria 4.0 melhoram em até 30% a sua produtividade. Um relatório da Deloitte (SCHROEK et al, 2019) indica que 94% dos executivos em empresas industriais veem a transformação digital como uma estratégia de alta prioridade.

As principais tecnologias da I4.0 podem ser separadas em oito principais *clusters*. Esses *clusters* representam grupos de tecnologia integrados e convergentes, que fundamentam o ambiente da digitalização industrial (IEL, 2018).

O *cluster* de Inteligência Artificial (IA) inclui também o *big data* e a computação em nuvem. Essas tecnologias, aplicadas em sistemas cyber-físicos, permite decisões autônomas e descentralizadas ao processar dados através de algoritmos inspirados no funcionamento do cérebro humano. Usando grandes volumes de dados, esses sistemas aprendem e tomam decisões, impactando processos, produtos e mercados. Embora em diferentes fases de desenvolvimento, a inteligência artificial avança rapidamente e possui aplicações amplas na indústria, servindo como base para outras tecnologias.

Uma rede de comunicação conecta computadores, tecnologias de transmissão e recursos para processar e compartilhar informações. A adoção do protocolo IP e a digitalização possibilitaram o surgimento da internet como uma rede global, integrando dispositivos de comunicação e processamento. As inovações nas redes de comunicação incluem redes em produtos conectados

e redes de infraestrutura, criando novos mercados. Na indústria, as redes são usadas de cinco formas: em produtos finais, no processo produtivo, na organização interna, na cadeia produtiva e no ciclo de vida do produto para monitoramento.

A Internet das Coisas (IoT) conecta dispositivos, máquinas e objetos cotidianos via internet, permitindo a troca de dados entre eles. A IoT utiliza sensores e *gateways* para coletar e processar informações, centralizadas em nuvem ou servidores. Suas aplicações incluem otimização produtiva, manutenção preditiva, eletrodomésticos inteligentes e gestão logística. Essas tecnologias permitem inovações, mas enfrentam desafios de interoperabilidade, padronização e segurança. Apesar de inicialmente incrementais, as inovações em IoT têm potencial de se tornarem transformadoras, conforme combinadas a outras tecnologias e usadas em sistemas produtivos.

A produção inteligente e conectada integra digitalmente unidades produtivas e suas cadeias de valor com tecnologias como manufatura aditiva, robótica colaborativa e IA, permitindo uma interação avançada entre o físico e o digital. Apesar da falta de padrões dominantes, essa abordagem melhora a flexibilidade, qualidade e eficiência dos sistemas, além de integrar sensores e atuadores com *softwares* de planejamento de recursos (*enterprise resource planning* - ERP). Também possibilita modelos de manufatura adaptáveis, customização de produtos e novos modelos de negócio, trazendo benefícios significativos para a transformação dos processos produtivos.

Materiais avançados oferecem novas propriedades a materiais tradicionais ou são novos com desempenho superior, desenvolvidos para serem seguros e escaláveis. Eles se classificam em nanomateriais, materiais funcionais/autorrepadores, de alto desempenho, de fontes renováveis e de biorrefinarias de terras-raras. Suas aplicações incluem embalagens e estruturas inteligentes, estruturas leves e resistentes, liberação controlada de substâncias, impressão eletrônica e 3D, materiais bioinspirados e ímãs permanentes para motores industriais.

Nanociência e nanotecnologia são áreas da ciência que estudam a matéria em escala nanoscópica, geralmente abaixo de 100 nanômetros, aplicando os conceitos e materiais derivados dessas pesquisas. Essas tecnologias evoluem de nanoestruturas ativas para sistemas de nanossistemas, impactando a organização das empresas e exigindo novas habilidades. As aplicações abrangem setores como nanomedicina (diagnóstico e terapia), nanocosméticos, nanoeletrônica, vestuário flexível, sensoriamento para IoT, energias auxiliares e tecnologias alimentares. Nos próximos anos, as principais áreas de aplicação incluirão vacinas, novos materiais para computação, sensores de precisão e segurança alimentar.

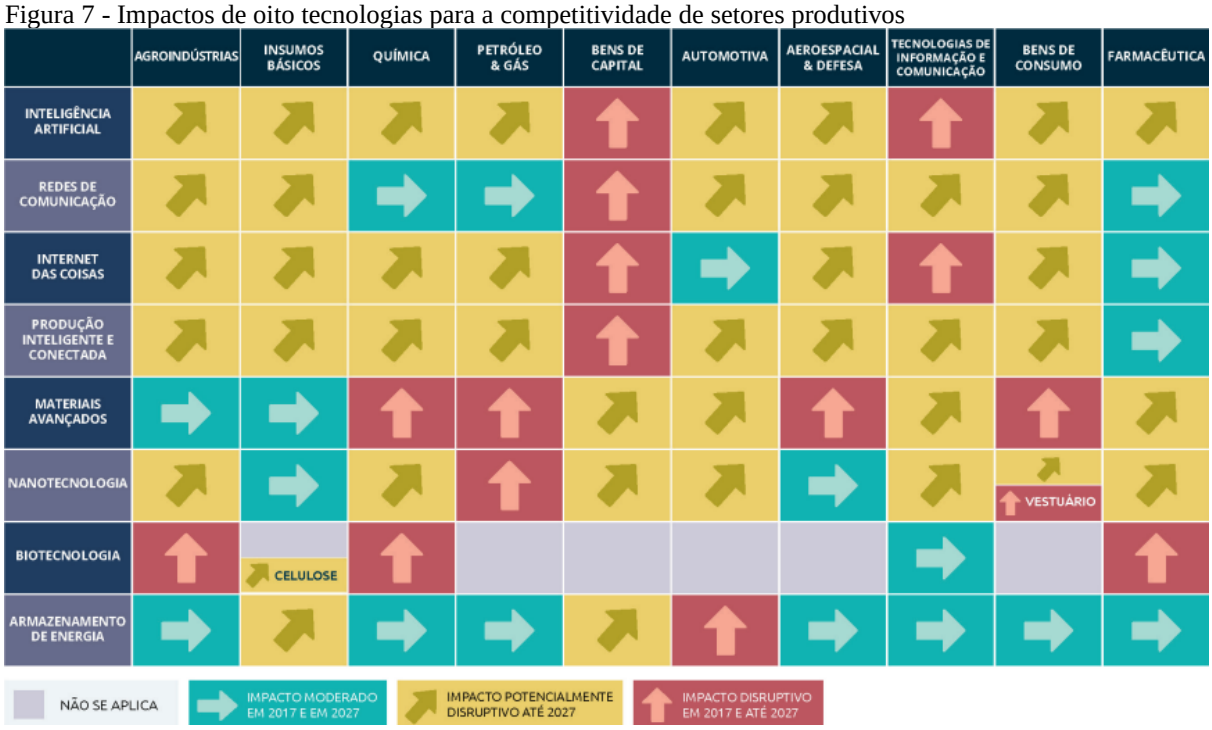
A biotecnologia é um conjunto de técnicas que intervêm no genoma de organismos vivos para criar ou modificar produtos, aprimorar plantas e animais, ou desenvolver micro-organismos. Ela abrange áreas como biotecnologia vermelha (saúde), verde (agricultura) e branca (indústria) e depende de tecnologias "ômicas"[33], bioinformática e técnicas avançadas de manipulação molecular. As inovações geradas nesse campo criam novos mercados e podem levar a mudanças organizacionais nas empresas farmacêuticas. Além disso, a combinação de genômica e biologia molecular estabelece novas abordagens, como a "medicina personalizada de precisão" e a agricultura de precisão. A edição gênica, que aprimora plantas sem genes externos, e a edição gênica em animais devem ter um papel significativo no futuro, permitindo melhorias em variedades adaptadas a diferentes condições.

O armazenamento eletroquímico de energia utiliza reações químicas para acumular energia elétrica, mas seu desenvolvimento tem sido lento. As soluções dessa tecnologia servem como insumos ou produtos finais em processos industriais, sendo aplicadas na eletrificação de sistemas produtivos, em produtos autônomos e na conservação de energia. Inovações em armazenamento eletroquímico, especialmente baterias, são essenciais para avanços em IoT, redes de energia e sistemas produtivos autônomos. Neste campo, coexistem tecnologias maduras, como baterias de chumbo-ácido e lítio-íon, e em desenvolvimento, incluindo pesquisas sobre armazenamento baseado em grafeno. As principais aplicações incluem garantir autonomia de sistemas, eletrificação de processos antes dependentes de combustíveis fósseis e segurança das matrizes energéticas. O sucesso dessas tecnologias depende de variáveis como portabilidade, tempo de recarga, potência e segurança, sendo que melhorias nessas áreas podem aumentar a sustentabilidade e o impacto disruptivo.

A figura 7 abaixo, presente no relatório Indústria 2027: Riscos e oportunidades para o Brasil diante de inovações disruptivas (IEL, 2018), apresenta o impacto dos principais *clusters* tecnológicos da I4.0 nos maiores setores da indústria.

[33] As tecnologias "ômicas" são um conjunto de técnicas que permitem estudar a função, interação e diferenças entre os tipos de moléculas que compõem as células de um organismo. O termo "ômicas" vem do inglês "omics" e as ciências ômicas são uma nova fase dos estudos de genética dos seres vivos. Algumas das tecnologias "ômicas" são: genômica: estuda o genoma de uma espécie, a partir da obtenção da sua sequência, para entender a sua estrutura, organização e função; transcriptômica: estuda o RNA mensageiro; proteômica: estuda as proteínas; metabolômica: estuda os produtos do metabolismo.

Figura 7 - Impactos de oito tecnologias para a competitividade de setores produtivos



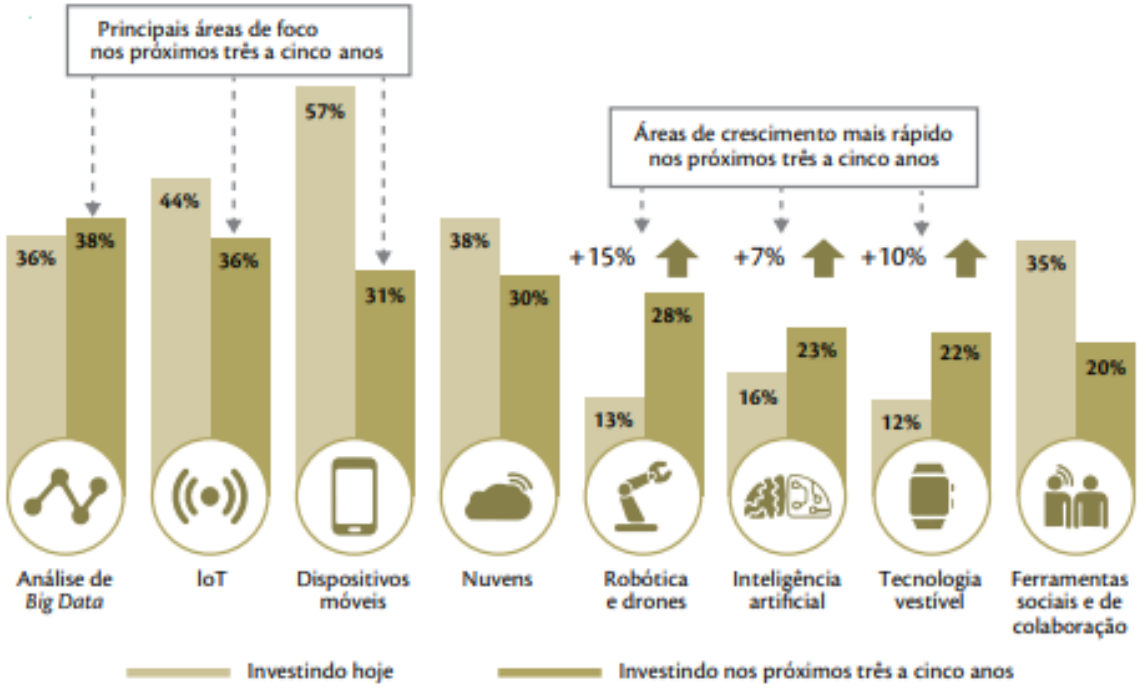
Fonte: IEL (2018)

A partir da análise da figura, destaca-se a interconexão de diversas tecnologias com impacto disruptivo no setor de bens de capital, assim como a presença de IA, IoT e produção inteligente na escala de impactos potencialmente disruptivos em diversos setores industriais. A indústria farmacêutica é o setor com maior quantidade de tecnologias com impacto moderado, porém é especialmente impactado pelo agrupamento de técnicas da biotecnologia. "[...] o cluster biotecnologia, central para o sistema produtivo farmacêutico, já provoca impactos disruptivos, abrindo caminhos para mudanças em modelos de negócio, em padrões de concorrência e, possivelmente, em estruturas de mercado" (IEL, 2018, p. 45).

Em uma visão mais específica, o setor automotivo já utiliza ferramentas de dinamismo e automação industrial há muito tempo. Para tarefas repetitivas e padronizadas, utiliza-se o conceito de robótica colaborativa, que permite que humanos e máquinas convivam em um mesmo chão de fábrica. Por outro lado, a digitalização impacta o setor principalmente com a implementação do *big data* e de ferramentas de simulações de processos. Outra tecnologia amplamente utilizada no setor automotivo é a realidade aumentada, em especial para a montagem e design de peças em um modelo 3D intuitivo (BORTOLINI et al, 2022). Os modelos tridimensionais podem ter reaproveitados para o treinamento de funcionários, por trazerem uma visão mais simples para o processo da montagem.

No setor de petróleo e gás, a expectativa é de que a transição para a I4.0 seja um processo evolucionário, e não revolucionário (WEF, 2017). A figura 8 abaixo aponta as principais áreas de investimento em tecnologias de digitalização em empresas do setor de petróleo e gás.

Figura 8 - Investimentos em tecnologias digitais no setor de petróleo e gás



Fonte: WEF (2017)

As três principais áreas de foco do setor são o *big data*, a IoT e os dispositivos móveis. O *big data* e a análise de dados auxilia as empresas do setor a navegar a grande quantidade de dados gerados por milhares de sensores em plataformas de perfuração *offshore*. No momento em que o relatório foi publicado, cerca de 36% das empresas investiam em *big data* e *analytics*, mas somente 13% usavam os insights dessa tecnologia para orientar sua abordagem em relação ao mercado e seus concorrentes, indicando uma margem para maior desenvolvimento de operacionalidade e produtividade.

A IoT, na indústria de petróleo e gás, permite a integração de tecnologias de informação (TI) e tecnologias de operação (TO) por meio da integração e comunicação máquina a máquina.

> Para a categoria *upstream*[34], a IIoT pode ajudar na otimização ao fornecer novos insights operacionais a partir da análise de conjuntos diversos de dados operacionais (como parâmetros de perfuração) e dados interdisciplinares (como modelos geológicos). As empresas de *midstream*[35] – por exemplo, transporte, incluindo

[34] Refere-se às atividades relacionadas à exploração e produção de petróleo e gás, como exploração, extração e perfuração de poços. É o caso de empresas como a Petrobras e a ExxonMobil.

[35] Envolve o transporte, armazenamento, comercialização e distribuição do petróleo e gás natural extraídos. Algumas empresas dessa categoria são TransCanada e Kinder Morgan.

> oleodutos e armazenamento, que buscam maior integridade da rede e novas oportunidades comerciais – devem se beneficiar significativamente da construção de infraestrutura habilitada para dados. Os players de *downstream*[36] (como refinadores e varejistas de produtos petrolíferos) podem ver potencial em novas oportunidades de receita, ao expandir a visibilidade da cadeia de suprimento de hidrocarbonetos e ao direcionar consumidores digitais com novas formas de marketing conectado (WEF, 2017, p. 9, tradução nossa[37]).

O investimento em tecnologias de dispositivos móveis permite o monitoramento de dados em tempo real por meio de softwares especializados em smartphones, melhorias no fluxo de trabalho devido à melhor comunicação em grupo, aumento da produtividade dos trabalhadores e melhor registro de dados de campo. Os outros segmentos de tecnologias apresentados na figura, como robótica, drones e inteligência artificial, ainda estão em estágios embrionários na maioria das empresas do setor, e ainda terão uma curva de crescimento em termos de sua adoção para a operacionalidade industrial.

No setor farmacêutico, além da já mencionada iniciativa da IoMT, algumas das tecnologias da I4.0 que trazem impactos são o *big data*, o *blockchain* e a impressão 3D (WEF, 2019). O *big data* permite o cruzamento de dados farmacogenômicos complexos e variados para auxiliar profissionais de saúde em tomadas de decisões. O *blockchain* permite um manuseio e compartilhamento mais estruturado de registros médicos e informações entre pacientes e fornecedores. O *blockchain* também permite a gestão da cadeia de abastecimento de medicamentos por meio do registro de cada etapa do fluxo. A impressão 3D permite adaptar elementos de dosagem, tamanho e forma de determinados medicamentos para pacientes com perfis específicos, além da possibilidade de combinação de múltiplos medicamentos em um único comprimido.

A indústria têxtil e da moda faz parte de um mercado que exige constante customização e personalização individual. Nesse contexto, tecnologias de produção baseadas em sistemas cyber-físicos como automação e manufatura aditiva permitem a consolidação de fábricas menores, mais autônomas e personalizáveis, que possibilitam com que o setor se adapte às tendências do mercado da moda e às preferências dos clientes.

---

[36] Engloba as etapas finais, onde o petróleo e o gás são processados e transformados em produtos finais. Atividades incluem Refino de petróleo bruto para produzir combustíveis (gasolina, diesel, querosene), produção de produtos petroquímicos (plásticos, fertilizantes) e distribuição e comercialização de produtos acabados, como combustíveis e lubrificantes. É o caso de empresas como Shell e BP.

[37] Do original: "*For the upstream category, IIoT can help with optimization by providing new operational insights from analysis of diverse sets of operational data (such as drilling parameters) and cross-disciplinary data (such as geological models). Midstream companies – for example, transportation, including pipelines and storage that aim for higher network integrity and new commercial opportunities – are expected to benefit significantly from building data-enabled infrastructure. Downstream players (e.g. petroleum-product refiners and retailers) could see potential in new revenue opportunities, from expanding visibility of the hydrocarbon supply chain and targeting digital consumers with new forms of connected marketing.*"

Em suma, diferentes setores têm adesão maior a diferentes categorias de tecnologias da I4.0 para o desenvolvimento de suas operações industriais. Essas tecnologias fundamentam a base para uma nova revolução industrial, com base na digitalização, interconexão e manufatura avançada.

2.5.3 Aprofundamento nas dinâmicas e dados de *reshoring*

O fenômeno do *reshoring*, caracterizado pela realocação de operações industriais de volta ao país de origem ou para regiões mais próximas, tem se intensificado entre empresas europeias nos últimos anos. Esse movimento é influenciado por diversos fatores, como mudanças nas condições econômicas globais, pressão por eficiência nas cadeias de suprimentos e necessidade de proximidade com o mercado consumidor. Para compreender melhor essas dinâmicas, este tema abordará uma análise quantitativa de dados de *reshoring*. Essa análise revela uma dinâmica interessante na reconfiguração das cadeias produtivas globais, impulsionada por mudanças nas estratégias corporativas e políticas industriais em resposta a fatores econômicos, geopolíticos e tecnológicos. Este item se propõe a examinar dados empíricos recentes sobre o movimento de *reshoring* de empresas europeias, com ênfase na desagregação dos dados por país de origem e setor industrial. Ao identificar os países e indústrias que lideram essa tendência de retorno da produção, a análise busca destacar os fatores determinantes e as particularidades regionais que influenciam essas decisões estratégicas.

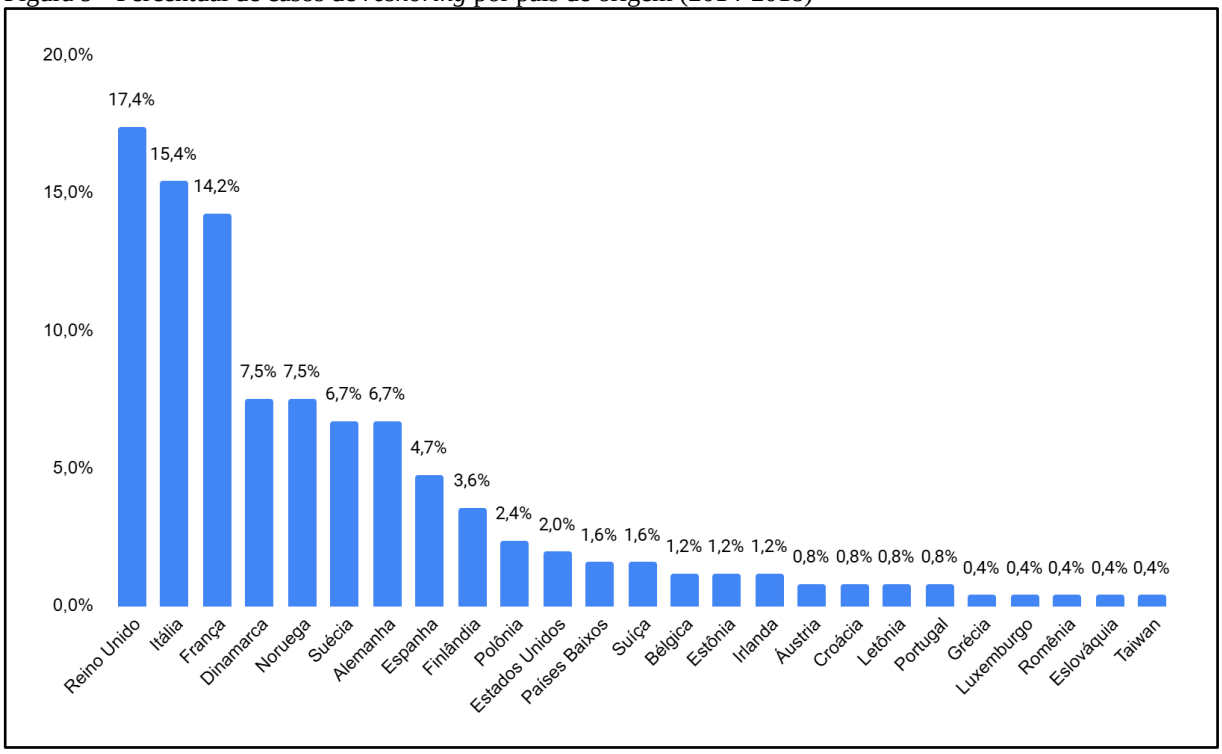
A fundamentação teórica base da pesquisa empírica abordada neste item se dá pelo relatório “Reshoring in Europe: Overview 2015–2018” (EUROFOUND, 2019) da Fundação Europeia para a Melhoria das Condições de Vida e de Trabalho em parceria com as universidades de Bologna, Catania, L’Aquila e Udine, que aborda e estuda 253 casos de *reshoring* em empresas europeias entre 2015 e 2018; e o artigo “Reshoring and Industry 4.0: How Often Do They Go Together?” (ANCARANI; DI MAURO, 2018), que analisa 840 iniciativas de *reshoring*.

2.5.3.1 Análise empírica por país

O estudo empírico da Eurofound (2019) aborda três concepções de *reshoring*: i) empresas europeias que tinham suas atividades industriais no *offshore* e estão realocando suas operações de volta ao país de origem; ii) empresas europeias que tinham suas atividades industriais localizadas em países fora da Europa e estão realocando suas operações para um país europeu diferente do país de origem; e iii) empresas não-europeias que tinham suas atividades industriais localizadas em países de fora da Europa e estão realocando suas operações para um

país europeu. Com base nessa definição, a figura 9 abaixo apresenta os países de origem dos casos de *reshoring* estudados na pesquisa.

Figura 9 - Percentual de casos de *reshoring* por país de origem (2014-2018)



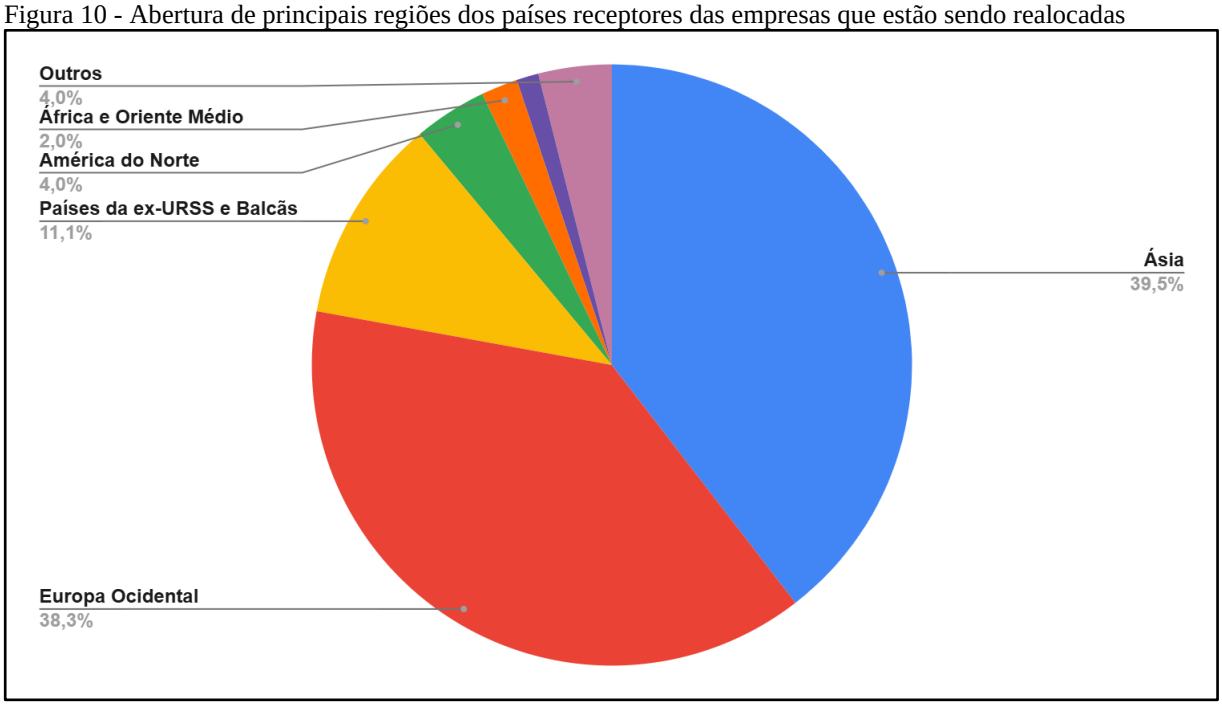
Fonte: Elaboração própria com dados de Eurofound (2019)

A figura apresenta que o Reino Unido, a Itália e a França abrigam a maior quantidade de empresas aderentes a processos de *reshoring* dentre todas as analisadas na amostra. O governo britânico, em especial após o *Brexit*, sente mais pressão para reduzir a dependência de fornecedores asiáticos e trazer a produção para mais perto, tanto por razões de segurança quanto para responder a mudanças nas políticas comerciais globais, como tarifas e restrições de importação. A Itália e a França têm forte presenta em setores industriais de alto valor agregado como moda, cosméticos e perfumes. Esses setores são muito sensíveis a tendências de mercado e à demanda por autenticidade e qualidade, o que pode incentivar dinâmicas de realocação industrial.. O *outlier* do gráfico é a Alemanha que, apesar de ser referência industrial na Europa, encontra-se com somente 6,7% dos casos de *reshoring*. Isso porque muitas montadoras alemãs do setor automotivo já estavam no território nacional antes do período analisado. No que tange a outros setores, o custo da mão de obra na Alemanha é um dos mais altos da Europa Ocidental, o que torna economicamente desvantajoso trazer de volta operações intensivas em mão de obra, especialmente quando comparado com países como Itália e Dinamarca, onde as pequenas e médias empresas (PMEs) se beneficiam mais diretamente de custos reduzidos ao relocalizar a

produção. Essas PMEs tendem a ser mais flexíveis e sensíveis aos custos, tornando o *reshoring* uma opção mais atraente nesses contextos. (BUTOLLO, 2020; ANDERSSON et al, 2018). Os países nórdicos aparecem como destaque no gráfico, muito por conta da razão *reshoring* por *offshoring* que esses países apresentam. Na Dinamarca, 47% das empresas aplicaram políticas de *reshoring* enquanto na Suécia o número é de 45% (HEIKILLÄ et al, 2018). Essas correspondem às maiores taxas da Europa. Os Estados Unidos e Taiwan aparecem no gráfico como exemplos de países cujas empresas mantinham atividades industriais no *offshore*, e no período analisado realocaram suas operações industriais para um país europeu.

A figura 10 traz a visão das principais regiões dos países receptores, que abrigaram as indústrias europeias em suas iniciativas de *offshoring*, e que agora estão sendo realocadas.

Figura 10 - Abertura de principais regiões dos países receptores das empresas que estão sendo realocadas



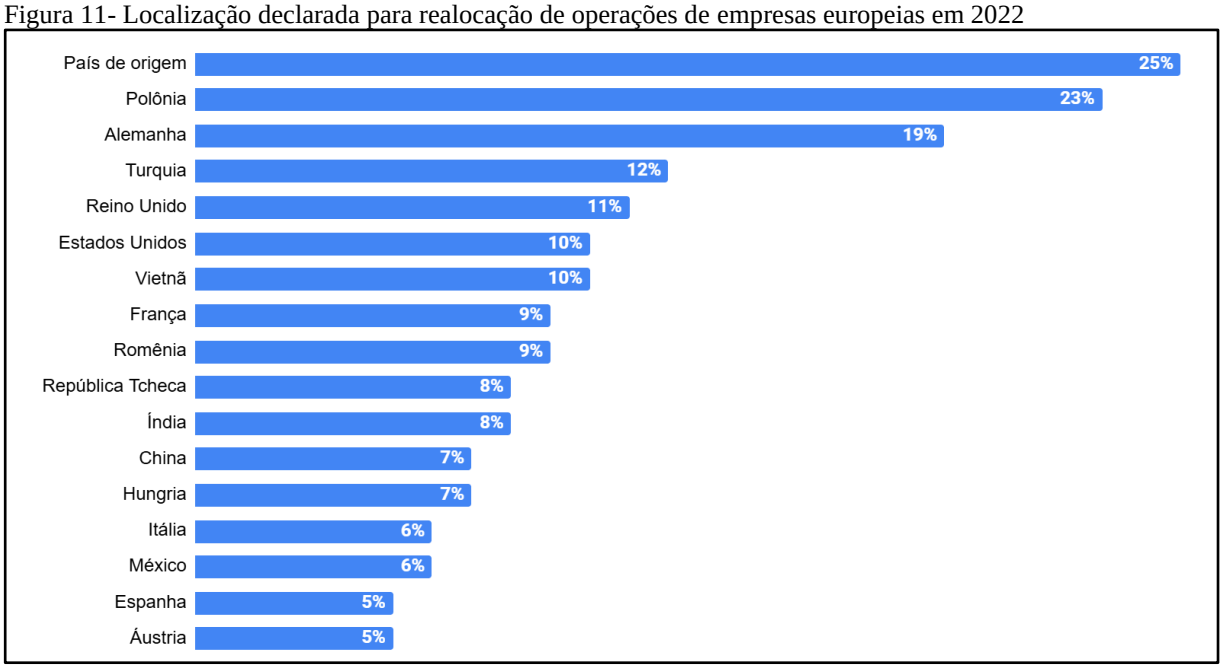
Fonte: Elaboração própria com dados de Eurofound (2019)

Os resultados deste gráfico demonstram pluralidade da realocação industrial. Essa é uma visão especialmente relevante para os tomadores de decisão das empresas, pois os motivos para repatriar a atividade industrial no primeiro momento para cada uma das regiões apresentadas na figura é bem diferente. O *offshoring* para a Ásia é atraente pela proximidade de grandes mercados expansivos, pela possibilidade de redução de custos produtivos via economia de escala e pela logística de cadeias de suprimentos já estabelecidas. No caso da figura 10, a China representa 76% do *share* dos casos da Ásia. O *offshoring* para outros países da Europa Ocidental muitas vezes pode ser benéfico pela proximidade com centros de P&D e

inovação, pela redução da complexidade logística e pela manutenção da imagem da marca. O Leste Europeu oferece mão de obra qualificada a custos menores em comparação com países da Europa Ocidental, ao mesmo tempo mantendo proximidade estratégica das potências do continente. Como muitos países do Leste Europeu são membros da União Europeia (UE), existe um ambiente regulatório estável e um mercado interno livre de barreiras tarifárias, o que é atrativo para empresas europeias. Como estes destinos têm motivos diferentes para serem alvos de políticas *offshore*, é natural que eles tenham motivos bem distintos para estarem sendo repatriados de volta ao país de origem.

A figura 11 apresenta dados de outro estudo (SAS, 2023) que analisou políticas de realocação industrial de 210 empresas europeias em 2022. O gráfico apresenta a localização que irá receber a atividade industrial que está sendo realocada. Este estudo, ao contrário do da Eurofound, inclui também empresas europeias que estão repatriando suas operações industriais para fora da Europa. É por isso que a figura 11 apresenta países de outros continentes.

Figura 11- Localização declarada para realocação de operações de empresas europeias em 2022



Fonte: Elaboração própria com dados de Sas (2023)

Os dados demonstram que 25% das decisões de realocação industrial se devem ao *reshoring*, enquanto uma expressiva somatória dos percentuais de outros países europeus indica uma tendência bastante significativa ao *nearshoring*. O principal destino do *nearshoring* é a Polônia, que está localizada no coração da Europa, oferecendo fácil acesso aos mercados da Europa Ocidental e Oriental. Isso permite tempos de transporte reduzidos e custos logísticos menores, o que é uma vantagem significativa para empresas que buscam uma cadeia de

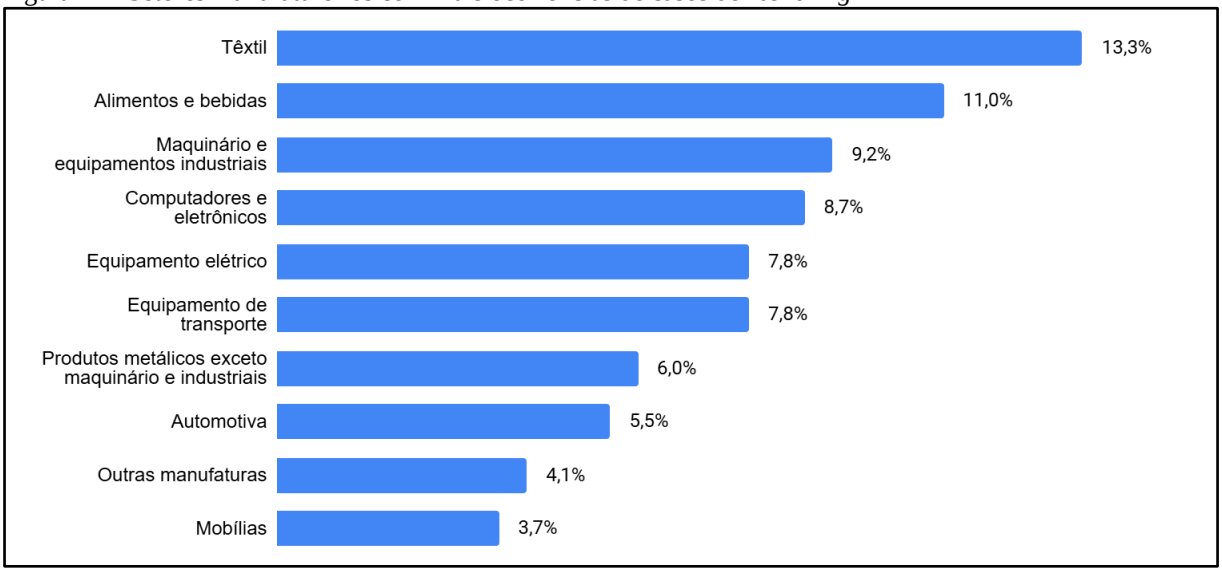
suprimentos mais ágil e eficiente. Além disso, a Polônia é um dos maiores beneficiários dos fundos de coesão da UE, que são utilizados para modernizar a infraestrutura e apoiar o desenvolvimento econômico, tornando o país ainda mais atraente para o investimento industrial. O Vietnã aparece também como um *player* expressivo neste tipo de dinâmica, em especial devido às empresas que buscam fugir do expansivo custo de mão de obra chinesa. O país ainda é membro de vários acordos de livre comércio, como o Acordo Abrangente e Progressivo para a Parceria Transpacífica (CPTPP) e o Acordo de Livre Comércio União Europeia-Vietnã (EVFTA). Esses acordos oferecem acesso preferencial a grandes mercados globais, reduzindo tarifas e facilitando o comércio.

2.5.3.2 Análise empírica por setor e impacto da Indústria 4.0

Diferentes setores produtivos possuem diferentes características, como estrutura de custos, cadeias de suprimentos, dependência de insumos importados, nível de automação e requisitos regulatórios. Além disso, o impacto de variáveis macroeconômicas, como taxas de câmbio e políticas comerciais, pode afetar de maneira diversa cada indústria. Isso implica que cada setor, por ser impactado de maneira tão singular a determinados *drivers* que podem incentivar a repatriação do complexo industrial, deve ser analisado de maneira individual e específica nesse contexto.

No estudo empírico conduzido pela Eurofound (2019), dos 253 casos de *reshoring* analisados, 86% se enquadram em empresas da indústria manufatureira, 5% em empresas de informação e comunicação, e 3% em companhias de atividades financeiras. Referente aos setores manufatureiros mais representativos, a figura 12 abaixo expõe os setores com maior recorrência de casos de *reshoring* dentro da amostra analisada.

Figura 12 - Setores manufatureiros com mais ocorrências de casos de *reshoring*



Fonte: Elaboração própria com dados de Eurofound (2019)

É neste momento que podemos analisar com mais fundamento o impacto das tecnologias da I4.0, na prática, nas políticas de *reshoring*. O setor têxtil apresenta a maior recorrência de casos, e é especialmente suscetível a políticas de *reshoring* por um cenário muito particular dessa indústria. A indústria têxtil é passível de transformações constantes e impactantes do mercado da moda. Uma linha produtiva próxima ao mercado consumidor possibilita uma maior capacidade de customização produtiva, tornando atrativa a repatriação industrial. Esse é um exemplo de manual do tipo de realocação industrial que recebe o nome de *reshoring* orientado pela flexibilidade (ANCARANI; DI MAURO, 2018), no qual tecnologias como a manufatura aditiva e os sistemas cyber-físicos possibilitam uma flexibilização da produção efetiva e com custos reduzidos. Além disso, a origem da marca, especialmente no setor de luxo, é um fator crucial na percepção de valor. Consumidores associam a origem a valores como herança, competência e altos padrões sociais. O "Made in Italy", "Made in France" ou "Made in UK" carregam um forte apelo de qualidade e tradição para consumidores, especialmente os que aspiram ao luxo. A produção em países de baixo custo pode ser vista como algo que diminui o valor do produto e da marca (MLODY; STEPIEN, 2020). O *reshoring*, ao trazer a produção de volta à origem da marca, reforça valores e imagem de prestígio e exclusividade, resgata uma aura de qualidade e autenticidade e promove transparência e a sustentabilidade, o que é valorizado pelos consumidores.

O setor de alimentos e bebidas aparece como um dos mais importantes em termos de políticas de *reshoring*. Como analisado anteriormente neste capítulo, este é um dos setores mais suscetíveis à implementação da digitalização do processo produtivo. O objetivo das empresas de alimentos e bebidas ao retornar suas bases industriais para os países de origem é ter maior

controle de qualidade sobre os processos produtivos, contatos com fornecedores e insumos. Técnicas como Logística 4.0 (BUTOLLO, 2020) se relacionam diretamente com a operacionalidade dessas empresas pois proporcionam a otimização da cadeia de suprimentos, previsão de demanda, planejamento de estoques e gestão eficiente de resíduos. É o exemplo de caso de *reshoring* orientado pela qualidade.

Os setores de manufatura de bens de capital, eletroeletrônicos e produtos metálicos, no geral, têm suas decisões operacionais fundamentadas em decisões de redução de custos ou em conflitos específicos com o país que recebeu a linha de produção *offshore*. Estes conflitos podem incluir tanto inseguranças geopolíticas, insatisfações com a cadeia de suprimentos ou elevação do custo da mão de obra local. Essa é a razão principal do estudo de Ancarani e Di Mauro (2018) identificar, dentre os casos de *reshoring* analisados na amostra, uma fuga da China de 50% das ocorrências. Neste estudo, a disposição de casos por setor é similar ao estudo de casa da Eurofound (2019), sendo 17% das ocorrências no setor têxtil, 17% no setor de maquinário e partes metálicas, 14% na manufatura de eletrônicos e 12% na indústria automotiva.

A indústria automotiva é um caso singular a ser analisado. A cadeia produtiva automobilística é extensa e complexa, composta em partes por componentes e peças de baixo valor como fios, conectores e peças plásticas, que ainda apresentam vantagens competitivas de serem mantidos em cadeias globalizadas devido aos seus custos de produção. No entanto, uma parte considerável da cadeia é composta pela manufatura de equipamentos tecnológicos de maior valor agregado. Essa etapa da linha produtiva é mais suscetível ao *reshoring* devido a fatores como tempo de entrega mais curto, possibilitando a criação de um modelo "just-in-time", melhor proteção de propriedades intelectuais e a maximização da qualidade da oferta de uma servitização de atividades relacionadas ao automóvel.

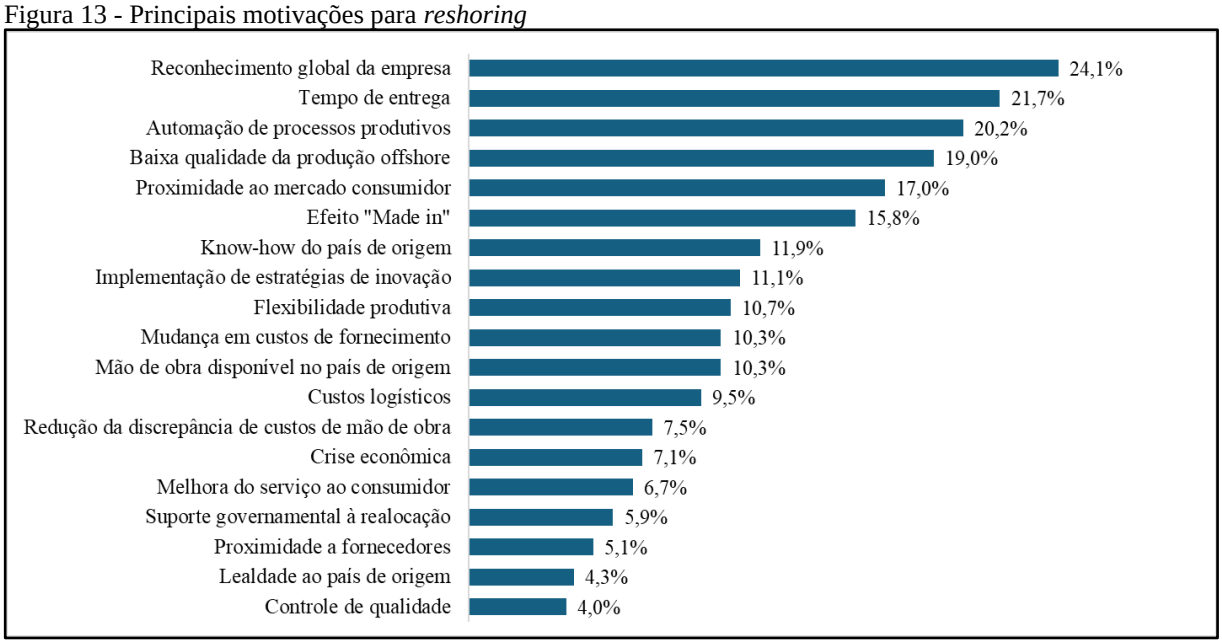
> O potencial para alguma relocalização da cadeia de suprimentos também está ligado à 'servitização' da manufatura e à transição para um modelo híbrido, no qual manufatura e serviços estão cada vez mais interligados. [...] Muitos fabricantes britânicos têm se posicionado bem para desenvolver o tipo de serviços e soluções de sistemas que os usuários finais procuram, e essa é uma forma de se diferenciarem dos concorrentes. Isso, por sua vez, poderia oferecer a perspectiva de essas empresas co-localizarem essas atividades, de modo a maximizar a qualidade da oferta para os clientes no Reino Unido e na Europa, proporcionando aos que optam pelo *reshoring* uma potencial vantagem competitiva (BAILEY; DE PROPIS, 2014, p. 52, tradução nossa[38]).

[38] Do original: "*The potential for some supply chain relocalisation also links in with the 'servitisation' of manufacturing and shift to a hybrid model where manu-facturing and services are increasingly intertwined. [...] Many British manufacturers have been well placed to develop the sort of services and system solutions that end users are looking for, and this is one way in which they can differentiate themselves from rivals. This in turn could offer the prospect of such firms co-locating such activities so as to maximise the quality of offering to customers in the UK and Europe, giving 'onshorers' a potential competitive advantage.*"

Algumas grandes montadoras, por uma combinação de todos esses fatores, optaram por realocar suas operações industriais para o país de origem, como a Volvo repatriando a fábrica chinesa para a Suécia (EUROFOUND, 2019) ou para países próximos, como a GM operando no Reino Unido (BAILEY; DE PROPIS, 2014) e a Ford no México (TIZO, 2021).

A figura 13 abaixo apresenta um agregado das principais causas para as empresas adotarem políticas de *reshoring* dentro da amostra da Eurofound (2019), englobando todos os setores industriais.

Figura 13 - Principais motivações para *reshoring*



Fonte: Elaboração própria com dados de Eurofound (2019)

A implementação de tecnologias da I4.0 na operação industrial dialoga diretamente com várias dessas motivações, em especial a automação de processos produtivos, a implementação de estratégias de inovação e a flexibilidade produtiva. No entanto, o escopo de cada motivação varia de acordo com a realidade e prioridades da empresa. As motivações podem ser separadas em três categorias principais, explicitadas no item 2.2 deste capítulo. O *reshoring* orientado pelo custo, que leva mais em consideração custos de fornecimento, mão de obra, logística e complexidade da cadeia *offshore*; o orientado pela qualidade que considera a proteção das patentes, a inovação do produto e o efeito “made in”; e o orientado pela flexibilidade, que considera mais a flexibilidade da produção e proximidade do mercado consumidor. A tabela 2 revela quais categorias de fatores as empresas no geral e aquelas que adotam a I4.0 em suas operações mais levam em consideração para tomar decisões de repatriação industrial.

Tabela 2 - Estratégias de *reshoring* e Indústria 4.0

Motivações	% todas as empresas	% empresas adotando Indústria 4.0
Custo	26%	15%
Qualidade	19%	18%
Flexibilidade	8%	2%
Custo + Qualidade	21%	35%
Custo + Flexibilidade	9%	13%
Qualidade + Flexibilidade	6%	4%
Custo + Qualidade + Flexibilidade	11%	13%

Fonte: Elaboração própria com dados de Ancarani e Di Mauro (2018)

Em empresas que não adotam a I4.0, as decisões de realocação são muito focadas em redução de custos operacionais e produtivos, somados a *drivers* relacionados à qualidade da produção. Já para empresas com adoção da digitalização na fábrica, a flexibilidade da produção ganha uma importância relativa, não como fator exclusivo para a decisão de transição, mas como fator combinado aos outros. Ainda assim, nesse modelo de indústrias, *drivers* de redução de custos e aumento da qualidade produtiva representam a motivação de 35% das empresas que optam por efetivar políticas de *reshoring*.

Em suma, o *reshoring* é uma política empresarial que ganhou força nos últimos 15 anos e está presente, em diferentes escalas, em muitos setores industriais, em especial de manufatura. Com base no estudo empírico-qualitativo apresentado neste capítulo, é possível observar como os fatores discutidos ao longo desta monografia se manifestam na prática. As análises de casos destacam a importância da automação, da digitalização e do uso de dados na tomada de decisão sobre realocação de operações, revelando que a busca por maior controle sobre a produção e a redução da vulnerabilidade nas cadeias de suprimentos são motivações centrais para o retorno das atividades produtivas. Os *insights* obtidos reforçam as tendências identificadas na literatura, demonstrando que a integração das novas tecnologias está transformando não apenas os processos internos das empresas, mas também sua estratégia de localização.

CONCLUSÕES

A Indústria 4.0 e o *reshoring* são conceitos independentes que podem ocorrer (e muitas vezes ocorrem) de maneira independente. O objetivo deste trabalho foi traçar uma linha comparativa para entender a sensibilidade que um conceito tinha na prática e exercício do outro. A Indústria 4.0, com seus avanços tecnológicos em automação, análise de dados e inteligência artificial, está redefinindo a forma como as empresas estruturam suas operações e estratégias de localização. Ao longo desta monografia, foi possível observar que a implementação de tecnologias da Indústria 4.0 não apenas promove ganhos de eficiência e redução de custos, mas também altera profundamente as decisões relacionadas à cadeia de suprimentos global, influenciando diretamente as políticas de *reshoring* e *nearshoring* de muitos setores da manufatura.

Os fatores que anteriormente justificavam a terceirização e a deslocalização de fábricas para países com menores custos de mão de obra estão sendo, em determinadas escalas e condições, gradualmente superados por tecnologias que permitem uma produção mais automatizada e eficiente e um controle digital do processo produtivo. Esse novo contexto reduz a dependência de trabalho intensivo e torna o retorno da produção aos países de origem uma opção muitas vezes atraente e estratégica. Empresas de diversos setores, especialmente os que exigem alta customização de produtos e rápida resposta ao mercado, estão se beneficiando das oportunidades de repatriar suas operações, aproximando-se de seus principais mercados consumidores e minimizando riscos associados a cadeias de suprimentos complexas e geograficamente distantes.

Este trabalho evidenciou que o movimento de *reshoring* não se trata apenas de uma decisão baseada em custos, mas também de uma estratégia para agregar valor através da integração de manufatura e serviços, promovendo a chamada “servitização” da indústria. Com o suporte das tecnologias da Indústria 4.0, as empresas têm conseguido oferecer soluções integradas e serviços customizados, o que aumenta a satisfação do cliente e fortalece o diferencial competitivo. Dessa forma, o *reshoring* se apresenta não só como uma alternativa para melhorar a resiliência operacional, mas também como uma estratégia de crescimento orientada pela inovação e pela criação de valor.

Apesar da tendência crescente de *reshoring*, a produção *offshore* continua a ser uma estratégia relevante para muitas empresas devido a fatores econômicos e operacionais. O custo reduzido de mão de obra em países como China, Vietnã e Índia, aliado a cadeias de suprimentos bem estabelecidas, oferece uma vantagem competitiva significativa, especialmente em setores

que operam com margens apertadas. Além disso, manter a produção em mercados emergentes permite às empresas aproveitar oportunidades de crescimento, atender rapidamente aos consumidores locais e se beneficiar de incentivos fiscais e infraestrutura robusta, elementos que muitas vezes não são facilmente replicáveis nos países de origem. Somado a isso, a aplicação da fábrica 100% automatizada, moderna, independente e autossuficiente ainda é uma realidade distante. Enquanto o chão de fábrica requerer trabalhadores, existirão países com vantagens comparativas e incentivos de mão de obra mais competitiva em termos de salários baixos, o que movimenta a globalização produtiva e possibilita cadeias *offshore*. A realidade, no entanto, já não é a de expansão exponencial e unidirecional aos países subdesenvolvidos e emergentes. Como visto ao longo desta monografia, muitos *drivers* tornaram-se proeminentes e relevantes para a consideração da decisão de repatriar o complexo manufatureiro para o país de origem.

É importante destacar que, embora o potencial do *reshoring* seja significativo, sua implementação eficaz depende de fatores como políticas governamentais favoráveis, infraestrutura adequada e disponibilidade de mão de obra qualificada. O papel dos governos em fomentar o desenvolvimento de tecnologias avançadas e capacitar a força de trabalho será crucial para maximizar os benefícios da Indústria 4.0 e facilitar a realocação das operações produtivas. O futuro das políticas de localização será moldado pela capacidade das empresas de alavancar as novas tecnologias para transformar seus modelos de negócios, equilibrando eficiência produtiva com proximidade de mercado e sustentabilidade de longo prazo.

REFERÊNCIAS

ALVES, F.; VENDRAMINI, E. Indústria 4.0: digitização como vantagem competitiva. **Pesquisa global Indústria 4.0: relatório setorial.** PWC Brasil, 2017

ANCARANI, A; DI MAURO, C. Reshoring and Industry 4.0: how often do they go together? **IEEE Engineering Management Review, Vol. 46, no. 2, Second Quarter**, June 2018.

ANDERSSON, J. et al. **Is apparel manufacturing coming home?** London: McKinsey Apparel, Fashion & Luxury Group, 2018.

ANDREONI, A. Varieties of industrial policy: models, packages and transformation cycles. **Columbia university press**, 2016.

_____. Technical change the shifting terrain of the 'industrial' and digital industrial policy. In: CHANG, H-J.; CRAMER, C.; KOZUL-WRIGHT, R.; OQUBAY, A. (ed.). **The Oxford Handbook of Industrial Policy.** Oxford University Press, 2020.

ARBIX, G. et al. Made in China 2025 e *Industrie 4.0*: a difícil transição chinesa do *catching up* à economia puxada pela inovação. **Tempo Social, revista de sociologia da USP**, v. 30, n. 3, 2018.

ASCANI, A; CRESCENZI, R; IAMMARINO, S. Economic institutions and the location strategies of European multinationals in their geographic neighborhood. **LSE 'Europe in Question' Discussion Paper Series.** Economic Geography, 2016.

BAILEY, D.; DE PROPIS, L. Reshoring: opportunities and limits for manufacturing in the UK – the case of the auto sector. **Revue d'économie industrielle.** De Boeck Supérieur, 2014.

BARBIERI, B. et al. What do we know about manufacturing reshoring? **Journal of Global Operations and Strategic Sourcing.** Emerald Publishing Limited, 2018.

BAUR, C.; WEE, D. **Manufacturing's next act.** McKinsey Quarterly, Jun, 2015.

BETTI, F.; BOER, E. Global Lighthouse Network: Insights from the forefront of the fourth industrial revolution. **World Economic Forum**. McKinsey & Company, 2019.

BETTI, F.; BOER, E.; GIRAUD, Y. A quarta revolução industrial e a grande reinicialização da manufatura. **McKinsey & Company**, 2020. Disponível em <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/the-fourth-industrial-revolution-and-manufacturings-great-reset/pt-br>. Acesso em 30 de out. de 2023.

BILBAO-UBILLOS, J. et al. Industry 4.0, servitization, and reshoring: a systematic literature review. **European research on management and business economics**. Elsevier, 2024.

BMBF. **Die neue Hightech-Strategie Innovationen für Deutschland.** Bonn, Berlin: Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2006.

_____. **Ideen. Innovation. Wachstum Hightech-Strategie 2020 für Deutschland.** Bonn, Berlin: Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2010.

_____. **Bericht der Bundesregierung Zukunftsprojekte Der Hightech-Strategie (HTSAktionsplan).** Bonn, Berlin: Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2012.

BMWi. **IKT-Strategie der Bundesregierung, Deutschland Digital 2015.** Innovationspolitik, Informationsgesellschaft, Telekommunikation. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, 2010.

BORNERT, X.; MUSOLINO, D. **The manufacturing reshoring phenomenon: a policy-oriented analysis of factors driving the location decision.** Bocconi University, 2024.

BORTOLINI, M. et al. Industry 4.0 technologies: a cross-sector industry-based analysis. **Sustainable Design and Manufacturing: Proceedings of the 8th International Conference on Sustainable Design and Manufacturing.** Spinger, 2022.

BRUN, L.; GEREFFI, G.; ZHAN, J. The "lightness" of Industry 4.0 lead firms: implications for global value chains. In: BIANCHI, P.; DURÁN, C.R.; LABORY, S. (ed.). **Transforming industrial policy for the digital age – production, territories and structural change.** Cheltenham: Edward Elgar Publishing Limited, 2019.

BRYNJOLFSSON, E.; MCAFEE, A. **The second machine age: work, progress, and prosperity in a time of brilliant technologies.** New York: Norton & Company, 2014.

BUTOLLO, F. Digitalization and the geographies of production: Towards reshoring or global fragmentation? **Competition & Change**, p. 1-20, 2020.

BUTOLLO, F.; JÜRGENS, U.; KRZYWDZINSKI, M. **From lean production to Industrie 4.0: more autonomy for employees?** Berlin: Springer International Publishing, 2018.

BUTOLLO, F.; STARITZ, C. **Deglobalization, reconfiguration, or business as usual? COVID-19 and the limits of reshoring of globalized production.** (Weizenbaum Series, 30). Berlin: Weizenbaum Institute for the Networked Society, 2022.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS - CGEE. **Indústria 4.0: segmentos ou nichos com maior potencial para o desenvolvimento tecnológico nacional.** Brasília, DF: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2022

CHANG, H-J.; ANDREONI, A. Industrial policy in the 21st century. **Development and Change**, v. 51, n. 2, p. 324-351, 2020.

CHESNAIS, F. **A mundialização do capital.** São Paulo: Xamã, 1996.

CINTRA, M. A. M; PINTO, E. C. China em transformação: transição e estratégias de desenvolvimento. **Revista de Economia Política.** São Paulo: Editora 34, 2017.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA - CNI. **Oportunidades para a indústria 4.0: aspectos da demanda e oferta no Brasil.** Brasília: CNI, 2017

_____. **Indústria 4.0 e digitalização da economia.** Brasília: CNI, 2018.

CORRÊA, L. M.; PINTO, E. C.; CASTILHO, M. **Trajetórias dos países nas cadeias globais de valor: padrões de atuação, estágios produtivos e mudança estrutural.** Texto para Discussão, IE-UFRJ, n. 7, 2017.

DABROWSKI, M. The risk of protectionism: what can be lost? **Journal of Risk and Financial Management.** MDPI, 2024.

DALENOGARE, L. et al. The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance. **International Journal of Production Economics.** Elsevier, 2018.

DIEGUES, A. C.; ROSELINO, J. E. Política industrial e Indústria 4.0: a retomada do debate em um cenário de transformações no paradigma tecnoprodutivo. **Revista Brasileira de Inovação**, Campinas, SP, v. 19, 2020.

_____. Industrial policy, techno-nationalism and Industry 4.0: China-USA technology war. **Brazilian Journal of Political Economy** (Impresso), v. 43, p. 5-25, 2023.

EVANS, H. Industry 4.0: examples of revolution in practice. **Velvetech**, 2024. Disponível em <https://www.velvetech.com/blog/industry-4-0/>. Acesso em 23 de out. de 2024.

EUROFOUND. Reshoring in Europe: overview 2015–2018. **Publications Office of the European Union.** Luxembourg, 2019.

FEL, F.; GRIETTE, E. Near-reshoring your supplies from China: a good deal for financial motives too. **Strategic Direction.** Emerald Publishing Limited, 2017.

FREY, C. B.; OSBORNE, M. A. **The future of employment: how susceptible are jobs to computerisation?** Technological Forecasting and Social Change, 2017.

GALLUCCIO, A. **Industry 4.0 in focus: the Adidas Speedfactory.** Louvain School of Management, Université catholique de Louvain, 2022.

GEREFFI, G.; LEE, J. Why the world suddenly cares about global supply chains. **Journal of Supply Chain Management**, 48(3), p. 24–32, 2012.

GRAY, J. et al. The reshoring phenomenon: what supply chain academics ought to know and should do. **Journal of Supply Chain Management.** The Ohio State University, 2013.

GUYON, I. et al. Analysis of the opportunities of industry 4.0 in the aeronautical sector. **10th International Multi-Conference on Complexity, Informatics and Cybernetics.** Paris, 2019

HAGEMANN, B.; OLIVEIRA, R. **O desafio de produzir mais.** Revista Veja, 2018. Disponível em <https://veja.abril.com.br/revista-veja/o-desafio-de-produzir-mais>. Acesso em 30 de out. de 2024.

HAGERTY, J. **Some firms opt to bring manu-facturing back to U.S.** Wall Street Journal, 2012.

HAMEED, B.; DURR, F.; ROTHERMEL, K. **RFID based complex event processing in a smart real-time factory, expert discussion: distributed systems in smart spaces.** Universitat Stuttgart, 2011.

HEIKILLÄ, J. et al. Manufacturing relocation abroad and back: empirical evidence from the Nordic countries. **World Review of Intermodal Transportation Research.** Tampere University of Technology, 2018

HERMANN, M. et al. Design principles for Industrie 4.0 scenarios. **In 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)**, 2016.

HIRATUKA, C. et al. C**omércio internacional: aspectos teóricos e as experiências indiana e chinesa.** Brasília: Ipea, 2010.

HOZDIC, E. Smart factory for Industry 4.0: a review. **International Journal of Modern Manufacturing Technologies.** University of Ljubljana, 2015.

HUTCHINSON, C. Curbing big tech's IoT dominance. **European Competition Journal.** Routledge, 2022.

INSTITUTO EUVALDO LODI - IEL. **Síntese dos resultados: construindo o futuro da indústria brasileira.** Brasília: Confederação Nacional da Indústria, v. 1, 2018

INTERNATIONAL FEDERATION OF ROBOTICS. **World Robotics 2016** (Executive Summary), no place: IFR, 2017.

JAMES, H. Deglobalization: the rise of disembedded unilateralism. **Annual Review of Financial Economics.** New Jersey, 2018.

KANO, L.; TSANG, E. W.; YEUNG, H. W-C. Global value chains: a review of the multi-disciplinary literature. **Journal of international business studies**, v. 51, p. 577-622, 2020.

KINKEL, S. Future and impact of backshoring:sSome conclusions from 15 years of research on German practices. **Journal of Purchasing and Supply Management**. Elsevier, 2014.

KROON, D.; BOER, E.; SHAHANI, R. The continuing evolution of the Global Lighthouse Network. **McKinsey & Company**, 2024. Disponível em <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/the-continuing-evolution-of-the-global-lighthouse-network>. Acesso em 25 de out. de 2024.

LEE, E. A.; SESHIA, S. A. **Introduction to embedded systems: a cyber-physical systems approach.** California, USA: Berkeley University of California, 2011.

LI, A. H. F. E-commerce and Taobao villages: a promise for China's rural development? **China Perspectives**, 2017.

LUCENA, F. A.; ROSELINO, J. E.; DIEGUES, A. C. A Indústria 4.0: uma análise comparativa entre as experiências da Alemanha, EUA, China, Coréia do Sul e Japão. **Geosul**, v. 35, p. 113-138, 2020.

LUCKE, D.; CONSTANTINESCU, C.; WESTKÄMPER, E. **Smart factory: a step towards the next generation of manufacturing, in manufacturing systems and technologies for the new frontier.** Springer, p. 115-118, 2008.

MANYIKA, J. et al. **Digital globalization: the new era of global flows.** New York: McKinsey Global Institute, 2016.

MEDEIROS, C. A. A economia política da internacionalização sob liderança dos EUA: Alemanha, Japão e China. In: FIORI, J. L. (Org.). **O Poder Americano.** Petrópolis: Vozes, p.139-178, 2004.

_____. Padrões de investimento, mudança institucional e transformação estrutural na economia chinesa. In: CGEE. **Padrões de desenvolvimento econômico (1950-2008): América Latina, Ásia e Rússia** (v.2). Brasília: CGEE, 2013.

MIT. MIT AMP 2.0. Cambridge: Massachusetts Advanced Manufacturing Innovation Forum, 2014. Disponível em <https://web.mit.edu/pie/amp/index.html>. Acesso em 19 de nov. de 2023.

MLODY, M. STEPIEN, B. Principles of reshoring development in luxury goods sector. **International Journal of Management and Economics.** Poznań University of Economics and Business, 2020.

MUSSOMELI, A.; GISH, D.; LAAPER, S. **The rise of the digital supply network: Industry 4.0 enables the digital transformation of supply chains.** Deloitte Insights, December 1, 2016.

OBSTFELD, M.; TAYLOR. A. M. **Global capital markets: integration, crisis, and growth.** Cambridge: Cambridge University, 2004.

ORGANIZAÇÃO PARA A COOPERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO - OCDE. **Making innovation policy work: learning from experimentation.** Paris: The World Bank, 2014.

_____. Analytical Business Enterprise Research and Development. 2024. Disponível em <https://data-explorer.oecd.org/vis?fs[0]=Topic%2C1%7CIndustry%252C%20business%20and%20entrepreneurship%23STI%23%7CIndustry%20dynamics%20and%20globalisation%23STI_IND%23&pg=0&fc=Topic&bp=true&snb=63&df[ds]=dsDisseminateFinalDMZ&df[id]=DSD_ANBERD%40DF_ANBERDi4&df[ag]=OECD.STI.STP&df[vs]=1.0>. Acesso em 28 de out. de 2024.

PINTO, E. C.; FIANI, R.; CORRÊA, L. M.; Dimensões da abordagem da cadeia global de valor: *upgrading*, governança, políticas governamentais e propriedade intelectual. **Cadeias globais de valor, políticas públicas e desenvolvimento.** Ipea: 2017.

PORTER, M.; RIVKIN, J. Choosing the United States. **Harvard Business Review**, 2012. Disponível em <https://hbr.org/2012/03/choosing-the-united-states>. Acesso em 8 de nov. de 2024.

RAJ, R.; LEE, I.; STANKOVIC, J. **Cyber-physical systems: the next computing revolution**. Des. Autom. Conf., p. 731–736, 2010.

RAZA, W. et al. **Post COVID-19 value chain: options for re-shoring production back to Europe in a globalised economy.** Brussels: European Union–Directorate General for External Policies of the Union, 2021.

REJIKUMAR, G. et al. Industry 4.0: Key findings and analysis from the literature arena. **Benchmarking: An International Journal, Vol. 26**. Bingley: Emerald Publishing Limited, p. 2514–2542, 2019.

SANTIAGO, F. What can policymakers learn from Germany's Industrie 4.0 development strategy? **Inclusive and Sustainable Industrial Development Working Paper Series.** Vienna: UNIDO, 2018.

SARTI, F.; HIRATUKA, C. **Indústria mundial: mudanças e tendências recentes.** Texto para Discussão IE/Unicamp, n.186, 2010.

SAS, A. Declared locations for relocation of sourcing or operations of European companies in 2022. **Statista**, 2023. Disponível em <https://www.statista.com/statistics/1383108/nearshoring-and-reshoring-of-european-companies/>. Acesso em 3 de nov. de 2024.

SCHINDLER, M. **AI-powered robotics: reinventing the shop floor to meet today's demands.** [Entrevista cedida a] Suzanne Schone. GMIS: Global Manufacturing & Industrialisation Summit, 2020

SCHROEK, M. et al. Digital industrial transformation: Reinventing to win in Industry 4.0. **Deloitte Insights.** Deloitte Development LLC, 2019

SCHWAB, K. N. D. **Aplicando a quarta revolução industria**l, 2018.

SEQUEIRA, M. **Developing decision-support tools for evaluation of manufacturing reshoring decisions.** Jönköping University, 2020.

STRANDHAGEN, J. O. et al. 2017. Logistics 4.0 and emerging sustainable business models. **Advances in Manufacturing 5**. Berlim: Springer Nature, p. 359–369, 2017.

STURGEON, T. Modular production networks: a new American model of industrial organization. **Industrial and Corporate Change**, p. 451-496, 2002.

_____. The "new" digital economy and development. **UNCTAD Technical Notes on ICT for Development nr. 8.** Geneva: UNCTAD, 2017.

TEIGLAND, J.; BAX, H.; LHERMITTE, M. Amid global competition for investment, what more can Europe do? **Ernst & Young.** EY, 2024. Disponível em <https://www.ey.com/en_gl/foreign-direct-investment-surveys/ey-europe-attractiveness-survey>. Acesso em 4 de nov. de 2024.

TEMOURI, Y. et al. How does protectionism impact multinational firm reshoring? Evidence from the UK. **Management International Review.** MIR, 2023.

TIZO, C. Enquanto Brasil perde fábricas da Ford, México negocia para reforçar presença da empresa no país. **Autoo**, 2021. Disponível em <https://www.autoo.com.br/enquanto-brasil-perde-fabricas-da-ford-mexico-negocia-para-reforcar-presenca-da-empresa-no-pais/>. Acesso em 12 de nov. de 2024.

UNESCO. **Unesco Science Report: towards 2030 Paris.** Unesco Publishing, 2015.

VANCHAN, V.; MULHALL, R.; BRYSON, J. Repatriation or reshoring of manufacturing to the U.S. and UK: dynamics and global production networks or from here to there and back again. **Growth and Change: A Journal of Urban and Regional Policy.** University of Birmingham, 2017.

WHITE, W.; BORCHERS, A. motivation behind reshoring decisions in manufacturing. **Operations and Supply Chain Management: An International Journal.** Lipscomb University, 2016.

THE WHITE HOUSE. **President Obama launches advanced manufacturing partnership.** Washington D.C.: Office of Press Secretary, 2011. Disponível em: <https://obamawhitehouse.archives.gov/the-press-office/2011/06/24/president-obama-launches-advanced-manufacturing-partnership>.Acesso em 19 de nov. de 2023.

WHITTAKER, D. et al. Compressed development. **Studies in Comparative International Development**, p. 439-467, 2010.

WORLD ECONOMIC FORUM - WEF. **Digital transformation initiative: oil and gas industry.** Geneva: WEF, 2017.

_____. **Health and healthcare in the fourth industrial revolution: global future council on the future of health and healthcare 2016-2018.** Geneva: WEF, 2019.

ZENG, M. **Smart business: Alibaba, the future of strategy, and what it means for you.** Boston, MA: Harvard Business Review Press, 2018.